

УДК 622.831: 622.28

проф. Литвинский Г. Г.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР, ligag@ya.ru)

СТАТИКА РАЗРУШЕНИЯ И ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОРОД ВОКРУГ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ

В настоящее время определение деформаций и смещений пород в горную выработку основано на эмпирических формулах и выполняется с недостаточной точностью. Цель исследований – разработка теоретических моделей проявлений горного давления (ПГД) для определения его параметров при образовании вокруг выработки зоны запредельных деформаций (ЗЗД). Исследования показали, что дилатансионная компонента деформации является главной и зависит от степени потери породой своей прочности и сплошности внутри ЗЗД. Полученные аналитические зависимости позволяют прогнозировать ПГД в статике (без учета времени), в том числе и в условиях больших смещений породного контура (геометрической нелинейности).

Ключевые слова: горное давление, выработка, запредельное поведение пород, статика деформаций, зона запредельных деформаций, разупрочнение пород, дилатансия, прогноз смещений, погрешности прогноза, закономерности деформаций.

1 Актуальность и задачи исследований

Существующая нормативная документация по прогнозу проявлений горного давления (ПГД) в капитальных и подготовительных горных выработках устарела и во многом основывается на эмпирических и отсталых представлениях о процессах деформирования и разрушения пород. Это объясняется недостаточным уровнем развития и использования теоретических моделей горной геомеханики, когда в расчетах ПГД использовались примитивные эмпирические подходы, которые без должных проверок и обоснований распространялись на все горно-геологические условия [1–3 и др.]. Проблема прогноза ПГД в подготовительных выработках еще более усложняется в условиях больших смещений пород, сравнимых по своей величине с размерами выработки (рис. 1).

Целью данной работы являлась разработка научных основ статике деформирования и разрушения горных пород вокруг подготовительных выработок для повышения надежности их проектирования, сооружения и эксплуатации.

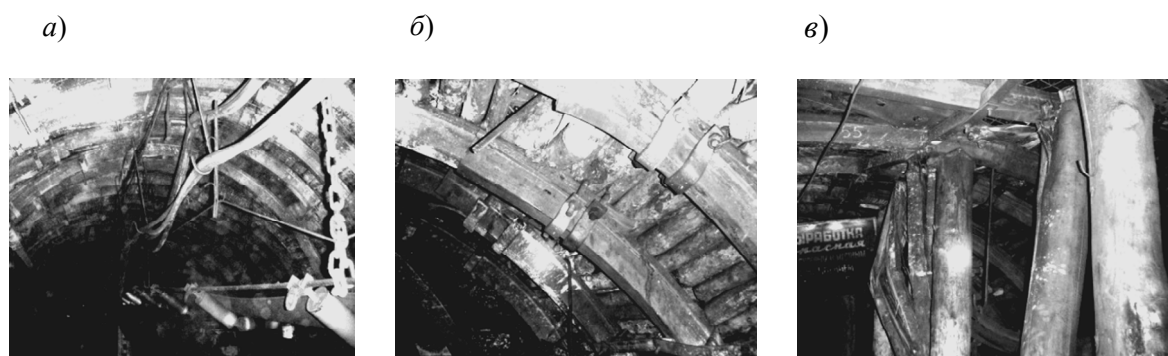
Идея работы состоит в использовании при рассмотрении ПГД так называемого «порождающего решения» [4], которое

дополняется зависимостями деформаций и смещений пород от их напряженно-деформированного состояния (НДС). При этом возникают новые законы формирования ЗЗД с учетом прочностной неоднородности и переменной дилатансии (расширения) пород при их разрушении.

В данной работе **объект** исследований — ПГД вокруг горных выработок, **предмет** исследований — закономерности деформирования пород в ЗЗД.

Основными задачами исследования в данной работе являются:

- 1) выявление и численный анализ источников деформации пород вокруг горной выработки;
- 2) формулирование и разработка физически обоснованных математических моделей для каждого вида деформаций;
- 3) обоснование принятых гипотез и идеализаций, получение теоретических зависимостей для деформаций и смещений пород вокруг выработки;
- 4) оценка достоверности и точности полученных результатов, анализ полученных результатов и формулирование направленных дальнейших исследований.



а) до влияния лавы, б) смещения замков крепи более 1 м; в) поломка верхняков и стоек усиления

Рисунок 1 Общий вид крепи и состояние устойчивости 25 западного коренного штрека шахты «Суходольская-Восточная» в зоне вредного влияния очистных работ

До настоящего времени [1–3 и др.] смещения массива пород в выработку определяют эмпирическими методами, причем лишь на породном контуре выработки, а не для всей области ЗЗД. Достоверность шахтных инструментальных наблюдений, положенных в основу эмпирических зависимостей, была невысокой и ограничивалась местными горно-геологическими условиями, где проводились шахтные измерения.

Попытки получить теоретические решения для определения смещений [5–7 и др.] были малопродуктивны из-за вынужденных упрощений и идеализаций принимаемых математических моделей ПГД. В частности, по умолчанию повсеместно постулировались однородность прочности и неизменность дилатансии в пределах ЗЗД, что существенно противоречило данным шахтных наблюдений. Кроме того, не оценивались все источники возможных смещений пород в ЗЗД. Выпал из поля зрения исследователей и вопрос определения зависимости смещений контура по мере роста размеров ЗЗД. Поэтому назрела необходимость решения подобных задач с более обобщенных и обоснованных позиций для развития теории и практики прогноза ПГД в выработках.

При формулировании задачи по описанию деформаций вокруг горной выработки

необходимо учитывать все слагаемые деформаций и смещений в окружающих выработку породах. Для статической постановки задачи (без учета влияния времени), возможны следующие источники смещений пород в выработку (рис. 2):

1) обусловленные деформациями массива горных пород на границе ЗЗД при $r = r_z$;

2) за счет упругой разгрузки пород в пределах ЗЗД по мере ее роста $a \leq r \leq r_z$, где a , r , r_z — соответственно радиус выработки, текущий радиус и радиус границы ЗЗД;

3) вызванные объемным расширением пород (дилатансией) при разупрочнении и разрушении пород внутри ЗЗД.

Кроме того, возможны также смещения от руинного крупноблочного разрушения пород из-за продольно-поперечного изгиба слоев при потере их устойчивости (по Эйлеру). Последняя форма смещений проявляется, как правило, при низкой несущей способности крепи в мелкослоистых слабых породах, она требует иной расчетной схемы и будет рассмотрена в дальнейшем.

При определении смещений пород следует учесть, что внутри ЗЗД породы частично потеряли сплошность, и прямое использование известных уравнений сов-

местности деформаций, как это делалось ранее, не всегда корректно и требует более общих подходов и особых обоснований.

2 Расчетная схема задачи определения смещений

Для решения поставленных задач примем следующую расчетную схему (рис. 2). Исходное напряженное состояние массива является гидростатическим, для произвольно расположенной в массиве декартовой системы координат x, y, z напряжения будут подчиняться равенству:

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = p, \quad (1)$$

где p — давление вышележащей толщи горных пород, $p = \gamma H$, Па;

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ — исходные нормальные напряжения в нетронутом массиве горных пород;

γ — усредненный по всей глубине H объемный вес пород, $\gamma \approx 25 \text{ кН/м}^3$.

Введем полярную систему координат r, θ с началом $r = 0$ в центре выработки (рис. 2).

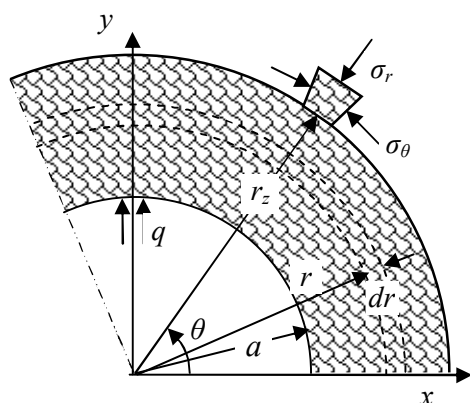


Рисунок 2 Расчетная схема задачи

На протяженном участке круглой выработки радиуса $r = a$ массив находится в плоско-деформированном состоянии. Если направить ось z вдоль выработки, ось y — по вертикали, а ось x — по горизонтали, то в окрестности выработки деформации пород $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ будут равны:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = Var, \varepsilon_z = Const. \quad (2)$$

Согласно полученному нами порождающему решению [4] о напряженном состоянии массива горных пород с прочностью на одноосное сжатие σ_c вокруг круглой горной выработки радиуса r_0 , напряжения в окрестности выработки при образовании в ее окрестности ЗЗД можно определить по формулам:

1) вне ЗЗД для области $\rho_z \leq \rho < \infty$:

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_r \\ \sigma_\theta \end{array} \right\} = p \mp (p - \sigma_r^*) \cdot \rho^{-2}; \quad \tau_{r\theta} = 0, \quad (3)$$

где $\rho = r/r_0$ — безразмерный радиус, изменяется в пределах $1 \leq \rho < \infty$;

$\rho_z = r_z/r_0$ — безразмерный радиус ЗЗД.

2) внутри ЗЗД для области $1 \leq \rho \leq \rho_z$:

$$\sigma_r = q \rho^\mu, \quad \sigma_\theta = (\mu + 1)q \rho^\mu, \quad (4)$$

где q — отпор крепи в выработке, Па; $\mu = k_\phi + k_c - 1$ — коэффициент устойчивости массива пород; он суммирует влияние коэффициента внутреннего трения k_ϕ , определяемого по формуле:

$$k_\phi = (1 + \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi), \quad (0 \leq k_\phi \leq 3), \quad (5)$$

и коэффициента возрастания прочности породы k_c внутри ЗЗД:

$$k_c = (k_\phi + 1) \frac{\sigma_c}{2p - \sigma_c} = \frac{\mu + 2}{2} \cdot \frac{\sigma_c}{p}. \quad (6)$$

Из (6) и (7) получим для коэффициента устойчивости:

$$\mu = 2 \frac{(k_\phi - 1)p + \sigma_c}{2p - \sigma_c}. \quad (7)$$

Коэффициент устойчивости изменяется в пределах $(k_\phi - 1) \leq \mu < \infty$, и чем он больше, тем меньше размеры ЗЗД и смещения породного контура, тем выше устойчивость горной выработки.

Граница распространения ЗЗД вглубь массива определяется безразмерным радиусом [3]:

$$\rho_z = \left[\frac{2p}{(\mu+2)q} \right]^{\frac{1}{\mu}} = \left[\frac{2p - \sigma_c}{(k_\varphi + 1)q} \right]^{\frac{1}{\mu}}. \quad (8)$$

В формуле (8) оба выражения эквивалентны, однако в дальнейшем мы будем использовать первое из них ввиду его большей компактности, наглядности и удобства преобразований.

3 Упругие смещения на границе ЗЗД

Определим смещения пород вокруг выработки, вызванные упругими деформациями массива пород на границе ЗЗД $\rho = \rho_z$. Для этого используем известную из теории упругости формулу для деформаций ε_r^* упругой среды на контуре круглого отверстия, подкрепленного радиальным напряжением, значение которого σ_r^* берем из первой формулы (5), подставляя в нее $\rho = \rho_z$:

$$\varepsilon_r^* = \frac{1}{2G}(2p - \sigma_r^*) = \frac{1}{2G}[2p - q \cdot \rho_z^\mu],$$

где G — модуль сдвига массива пород, $G \approx 10^3 \dots 10^5$ МПа.

Полученная зависимость оказывается справедливой при произвольном изменении размеров ЗЗД в пределах от $\rho = 1$ до границы $\rho = \rho_z$. Когда граница ЗЗД достигла своего предельного размера $\rho = \rho_z$, можно подставить сюда значение радиуса ЗЗД из (8), что для радиальных деформаций и смещений на границе $r = r_z$ даст:

$$\varepsilon_r^* = \frac{\mu+1}{\mu+2} \cdot \frac{p}{G}; \quad U_{rz}^* = \varepsilon_r^* r_z. \quad (9)$$

Чтобы определить смещения вдоль радиуса r при фиксированной границе ЗЗД r_z , необходимо воспользоваться формулой:

$$U_r^* = \varepsilon_r^* r_z^2 / r, \quad (r_0 \leq r \leq r_z). \quad (10)$$

Таким образом, первая часть общей задачи нахождения смещений решена. Анализируя полученные зависимости, можно предварительно оценить порядок получаемых смещений контура:

$$\varepsilon_r^* \approx \frac{p}{G} \approx \frac{10^{1\dots 2}}{10^{4\dots 5}} \approx 10^{-3} - 10^{-4}.$$

Следовательно, для горных выработок обычных размеров упругие радиальные смещения весьма незначительны и не превышают буквально нескольких миллиметров, что позволяет в дальнейшем ими пренебречь без заметной потери точности расчетов.

4 Смещения от упругой разгрузки пород внутри ЗЗД

При рассмотрении процессов упругого смещения пород, которые после запресованного деформирования с образованием ЗЗД претерпевают упругое восстановление объема, следует принять во внимание, что в осесимметричной задаче такое изменение скажется лишь на радиальной компоненте деформаций.

Как известно, упругое восстановление объема пород, так же, как и в любой другой упругой среде, зависит от изменения шарового тензора напряжений до и после образований ЗЗД.

В нетронутым массиве горных пород на основании обобщенного закона Гука и при условии (1) шаровой тензор напряжений равен:

$$\sigma_0 = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) / 3 = p. \quad (11)$$

После сооружения горной выработки и образования ЗЗД в массиве пород возникает иное распределение напряжений, и шаровой тензор на произвольном радиусе r с учетом (1)–(5) становится равным:

$$\sigma_{0z} = \frac{\sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_z}{3} = \frac{\mu+2}{3} q \rho^\mu + \frac{p}{3}. \quad (12)$$

Зная исходное σ_0 и измененное σ_{0z} значения шаровых тензоров, приступим к

определению деформаций от упругого восстановления пород внутри ЗЗД. Для этого выделим на текущем радиусе r в ЗЗД элементарное кольцо толщиной dr (рис. 2) и определим приращение его объема $2\pi r dr$ за счет упругого восстановления:

$$dV_0 = 2\pi r \cdot dr \cdot (\sigma_0 - \sigma_{0z}) / K, \quad (13)$$

где K — объемный модуль упругости породы, $K \approx 10^6 \dots 10^8$ МПа.

Интегрируя (13) по заданной толщине ЗЗД от r_0 до r , получим изменение объема на этой части ЗЗД:

$$\Delta V_0 = \int_{r_0}^r dV_0 dr = 2\pi K^{-1} \int_{r_0}^r r (\sigma_0 - \sigma_{0z}) dr. \quad (14)$$

После подстановки (12), (13) в (14) и интегрирования, получим:

$$\Delta V_0 = \frac{2\pi r_0^2}{3K} \left\{ p[(\rho)^2 - 1] - q[(\rho)^{\mu+2} - 1] \right\}. \quad (15)$$

Определим радиальные смещения контура U_r исходя из вычисления разницы объемов пород до и после их упругого восстановления внутри ЗЗД, что приводит к квадратному уравнению:

$$\pi \left[r_0^2 - (r_0 - U_r)^2 \right] = \Delta V_0, \quad (16)$$

решение которого дает искомую зависимость:

$$\varepsilon_r = 1 - \sqrt{1 - \Delta V_0 / A_0}, \quad (17)$$

или, пренебрегая величинами порядка ε_r^2 , получим в первом приближении:

$$\varepsilon_r \approx \Delta V_0 / 2A_0, \quad (18)$$

где $\varepsilon_r = U_r / r_0$ — радиальные деформации породного контура выработки;

$A_0 = \pi r_0^2$ — площадь горной выработки в черне.

Таким образом, получено уравнение радиальных деформаций и смещений пород

в выработку от упругой разгрузки массива при образовании ЗЗД.

Если произвести оценку ожидаемой величины смещений пород из-за их упругого восстановления в пределах ЗЗД, то, подставляя ориентировочные значения входящих в (16) переменных, получим деформации порядка:

$$\varepsilon_r \approx \frac{\Delta V_0}{2A_0} \approx \frac{p}{K} = \frac{10^{1\dots 2}}{10^{6\dots 8}} = 10^{-5} \dots 10^{-6},$$

а для смещений U_r породного контура выработки обычных размеров $r_0 \approx 2 \dots 4$ м оценка дает в мм значение:

$$U_r = \varepsilon_r r_0 \approx (10^{-5} \dots 10^{-6}) \cdot 4 \approx 10^{-5} \text{ м.}$$

Как видим, порядок ожидаемых смещений весьма мал и не превышает сотых долей миллиметра. Это делает возможным не учитывать такого рода смещения контура выработки в дальнейшем.

5 Закономерности дилатансии пород внутри ЗЗД

Переходим к решению наиболее сложной проблемы смещений пород: к определению радиальных деформаций, вызванных расширением пород при их сдвиговом разрушении в процессе образования ЗЗД.

Попытки учесть дилатансию делались и ранее, однако всегда полагали, что она является скаляром, который не зависит от напряженного состояния породы, т. е. она является постоянной в ЗЗД, что, как правило, приводит к грубым ошибкам.

Уравнение для определения дилатансии dV_d элементарного объема dV целесообразно представить в виде:

$$dV_d = k_d dV, \quad (19)$$

где k_d — функция дилатансии, которая зависит от физико-механических свойств горной породы, напряженного состояния элементарного объема dV и степени потери прочности (разупрочнения) пород внутри ЗЗД.

Поскольку до настоящего времени определение функции дилатансии $k_d(r)$ не проводилось, будем эту функцию искать, исходя из наиболее простой и физически оправданной гипотезы: дилатансия пропорциональна степени разупрочнения («поврежденности») породы $\Omega(r)$ в процессе ее разрушения:

$$k_d = d_m \cdot \Omega(r), \quad (20)$$

где d_m — постоянная, равная предельному значению коэффициента разрыхления породы при ее полном разупрочнении $\Omega(r) = 1$ от сдвиговых деформаций, определяется экспериментально для каждого типа породы.

Для учета разупрочнения породы внутри ЗЗД на разной ее глубине введем нормированную функцию разупрочнения $\Omega(r)$:

$$\Omega(r) = 1 - \sigma_s(r) / \sigma_c; \quad (0 \leq \Omega(r) \leq 1), \quad (21)$$

где $\sigma_s(r)$ — остаточная прочность породы внутри ЗЗД на глубине r :

$$\sigma_s(r) = k_c \sigma_r = k_c \cdot q \cdot \rho^\mu; \quad (22)$$

σ_c — прочность неразрушенной породы на одноосное сжатие, равная при $\rho = \rho_z$:

$$\sigma_c = k_c \sigma_r(\rho_z) = k_c \cdot q \cdot \rho_z^\mu.$$

Подставляя (22) в (21) с учетом (7) и (9), получим для функции разупрочнения зависимость в виде:

$$\Omega(r) = 1 - (\rho / \rho_z)^\mu, \quad (23)$$

откуда на контуре горной выработки находим максимальное $\Omega(r_0) = 1 - \bar{\rho}_z^\mu$, а на границе ЗЗД ($\rho = \rho_z$) — минимальное $\Omega(r_z) = 0$ разупрочнение пород.

На рисунке 3 показаны характерные графики изменения показателя разупрочнения пород $\Omega(r)$ на разном расстоянии от породного контура выработки для различ-

ных типов горных пород. Наибольшему разупрочнению в пределах ЗЗД подвергаются аргиллиты, наименьшему — песчаники, алевролиты занимают промежуточное положение.

Физический смысл коэффициента разрыхления d_m довольно прост: он равен верхнему пределу дилатансии для данного литологического типа пород с заданным углом внутреннего трения φ . В отличие от обычного коэффициента разрыхления, который показывает увеличение объема породы при ее отделении от массива (выемке), внутренний коэффициент разрыхления d_m связан лишь с увеличением объема породы при ее сдвиговых деформациях до начала разделения на несвязные отдельности.

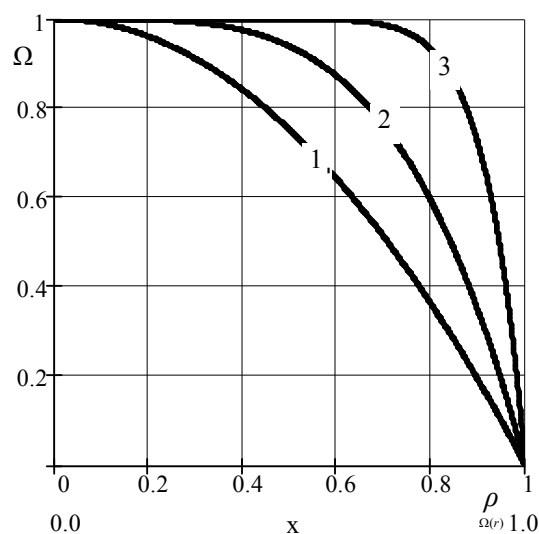


Рисунок 3 Изменение показателя разупрочнения Ω по глубине ЗЗД при разных значениях показателя устойчивости выработки μ для: 1 — аргиллитов ($\mu = 2$), 2 — алевролитов ($\mu = 4$), 3 — песчаников ($\mu = 12$)

При самых неблагоприятных условиях разрушения породы, когда наименьшая компонента тензора напряжений равна нулю, т. е. в условиях сдвиговых деформаций при одноосном сжатии, верхний предел дилатансии будет зависеть лишь от способности сопротивления породы сдвигам, т. е. от

параметра угла внутреннего трения k_φ согласно формуле (6). Чем больше этот угол φ , тем больше порода увеличивает свой объем при сдвиговом разрыхлении.

На основании накопленных экспериментальных данных при проведении шахтных инструментальных наблюдений [7 и др.], для определения d_m можно предложить следующее аппроксимирующее уравнение:

$$d_m = 0,3 \cdot \operatorname{tg} \varphi = 0,3 \cdot f, \quad (0 \leq d_m < 0,2), \quad (24)$$

где $f = \operatorname{tg} \varphi$ — коэффициент внутреннего трения породы.

Для идеально пластичных пород, у которых $\varphi \approx 0$, разрыхление отсутствует и коэффициент внутреннего разрыхления минимален $d_m = 0$. С увеличением угла внутреннего трения φ разрыхление увеличивается.

Окончательное выражение для функции дилатансии после преобразований и упрощений будет иметь достаточно простой вид:

$$k_d(\rho) = d_m \cdot \Omega(\rho) = d_m \cdot \left[1 - (\rho / \rho_z)^\mu \right]. \quad (25)$$

Уравнение (25) для описания особенностей дилатансии пород при их разрушении позволяет перейти к решению основной задачи — определению смещений пород в выработку

7 Смещения пород в ЗЗД от дилатансии

Чтобы приступить к определению искомым деформаций и смещений пород от дилатансионных эффектов, сопровождающих их разрушение, используем исходную расчетную схему (рис. 2).

Запишем уравнение дилатансии пород для произвольного кольца элементарной ширины внутри ЗЗД. При этом мы избегаем использования уравнения неразрывности деформаций, которое внутри ЗЗД некорректно из-за разрушения породы, а производим прямое определение объема расширения породы при разрушении.

Дилатансию в виде приращения dV_d элементарного объема dV кольца шириной dr внутри ЗЗД можно представить в виде:

$$dV_d = k_d dV = k_d(r) \cdot 2\pi r dr. \quad (26)$$

Вначале вычислим приращение объема пород от их дилатансии в процессе развития ЗЗД. Для этого следует проинтегрировать (26) от границы r_z ЗЗД до переменной по радиусу глубины r :

$$V_d(r) = \int_{r_z}^r k_d(\rho) dV = 2\pi \int_{r_z}^r k_d(\rho) \rho d\rho. \quad (27)$$

Подставляя (26) в (27) и интегрируя от r_z до r , получим:

$$V_d = \frac{\pi d_m r^2}{\mu + 2} \left[\mu + 2 - \mu \left(\frac{r_z}{r} \right)^2 - 2 \left(\frac{r}{r_z} \right)^\mu \right]. \quad (28)$$

Для определения радиальных смещений и деформаций пород вокруг выработки, следует воспользоваться формулами, аналогичными (17) и (19)

$$\varepsilon_r = 1 - \sqrt{1 - V_d / A_0}, \quad (29)$$

или, пренебрегая величинами порядка ε_r^2 и используя безразмерный радиус ρ , получим:

$$\varepsilon_r \approx \frac{V_d}{2A_0} = d_m \left[(\rho^2 - 1) - \frac{q}{p} (\rho^\mu - 1) \right]. \quad (30)$$

Полученное выражение имеет достаточно простой и удобный для расчетов вид и позволяет определить радиальную деформацию пород вокруг выработки внутри ЗЗД при произвольном значении относительного радиуса в пределах $1 \leq \rho \leq \rho_z$.

Таким образом, в полученном решении удалось выявить и учесть физическую нелинейность при образовании ЗЗД, связанную с проявлением феномена дилатансии и отклонениями поведения материала (породы) при его разрушении от линейной пропорциональности деформаций и напряжений (закон Гука).

8 Учет геометрической нелинейности деформаций

В условиях интенсивного проявления горного давления нередко смещения пород в горную выработку могут достигать значительных величин, сравнимых с размерами выработки. Попытка прогноза ПГД для таких условий часто оказывается неудачной, поскольку расчетные значения смещений породного контура превышают радиус выработки, что противоречит физическому смыслу задачи. Это вызвано тем, что в существующих методах прогноза смещений используют по умолчанию линейные приближения для определения деформаций (мера Коши). На самом деле при больших

деформациях породного контура ($\varepsilon_r > 0,5$) мера Коши неприменима.

В условиях геометрической нелинейности, вызванной большими деформациями конструкции, следует перейти к «истинным» деформациям (мера Генки). В сопротивлении материалов расчеты, в которых учитывают геометрическую нелинейность, иногда называют расчетами по деформированной схеме. Для нашей расчетной схемы связь между обычными ε_r (мера Коши) и истинными e_r (мера Генки) радиальными деформациями будет иметь вид:

$$e_r = 1 - \exp(-\varepsilon_r). \quad (31)$$

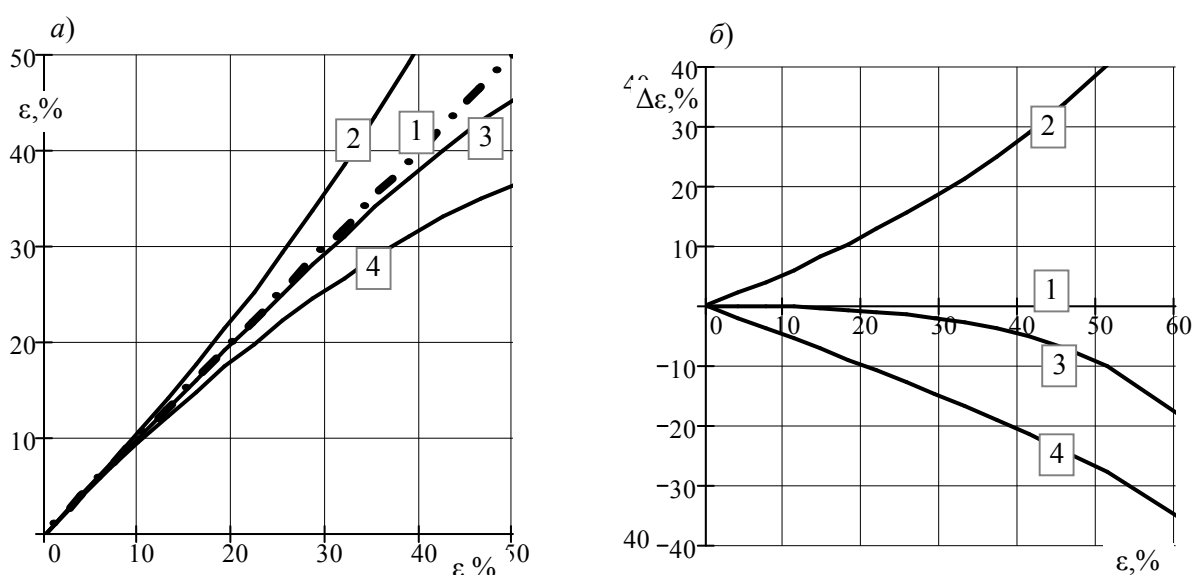


Рисунок 4 Сопоставление радиальных деформаций контура выработки (а) и оценка их отклонений (б) от истинных значений (мера Генки) при разных идеализациях расчетных схем: 1 — истинные (32); 2 — истинные с линейризацией уравнения (30); 3 — мера Коши с линейризацией (30); 4 — мера Коши без линейризации (31)

Из этого уравнения следует, что при больших деформациях, когда $\varepsilon_r \rightarrow \infty$, истинная деформация стремится к ограниченному предельному значению $e_r \rightarrow 1$.

Это значит, что выработка полностью заполняется породой в результате смещений породного контура. Исходные граничные значения этих мер деформаций совпадают: $e_r = \varepsilon_r = 0$.

С практической точки зрения представляет интерес проанализировать, какие неточности возникают при использовании для вычисления смещений пород вокруг горной выработки различных мер деформаций и когда следует для достижения точности вычислений переходить от обычной ε_r к истинной e_r деформации.

С этой целью были выполнены сравнительные расчеты истинных (мера Генки) деформаций (31) с учетом геометрической нелинейности и этих же деформаций с линеаризацией по формуле (30), а также радиальных деформаций без учета геометрической нелинейности по мере Коши (29) и их значения путем линеаризации (30) в виде (31).

Результаты вычислений представлены графиками на рисунке 4, на первом из которых (а) даны сравнения радиальных деформаций, вычисленных по разным формулам, а на втором (б) — их отклонения в % от истинных деформаций с учетом нелинейности.

Из графиков рисунка 4 видно, что наименьшие отклонения от истинных деформаций дают вычисления по самой простой формуле с использованием меры Коши согласно уравнению (30). При этом погрешность формулы (30) даже при смещениях породного контура выработки в пределах 50...60 % от исходного размера не превышает 10...15 %, что вполне допустимо с учетом требований практического применения такого рода прогноза. Такой неожиданный результат объясняется тем, что происходит взаимная компенсация погрешностей вычислений, что хорошо видно по графикам 2 и 4, и в итоге более точным оказывается график 3 на рисунке 3.

При больших смещениях массива пород вокруг выработки ее поперечное сечение не удовлетворяет условиям технической эксплуатации и выработку необходимо ремонтировать или перекреплять, при этом выполнение точных расчетов смещений (за исключением особых условий и целей) теряет смысл.

Следовательно, для подавляющего большинства горно-геологических условий можно вести расчеты деформаций по формуле (30), погрешность которой не превышает 10...15 % вплоть до уровня деформаций $\varepsilon_r \leq 50...60 \%$.

9 Анализ расчетов деформаций пород вокруг выработки

Для наглядного представления поведения массива горных пород вокруг выработки при образовании ЗЗД были выполнены расчеты радиальных деформаций для наиболее характерных горно-геологических условий и литологических разностей пород.

В качестве демонстрационного примера была взята круглая горная выработка на глубине 1000 м, закрепленная податливой крепью с сопротивлением 50 кПа.

Для сравнения были взяты наиболее представительные для горно-геологических условий Донбасса три типа литологических разностей пород:

- 1 — песчаники;
- 2 — алевролиты (песчаные сланцы);
- 3 — аргиллиты (глинистые сланцы),

со следующими геомеханическими свойствами соответственно:

– показатели прочности на одноосное сжатие (в массиве с учетом масштабного эффекта и структурной нарушенности)

$$\sigma_c = 1) 40 \text{ МПа}; 2) 30 \text{ МПа}; 3) 25 \text{ МПа};$$

– углы внутреннего трения при линеаризации паспорта прочности породы в области предельного круга одноосного сжатия диаграммы О. Мора [8]:

$$\rho = 1) 30^\circ; 2) 25^\circ; 3) 20^\circ.$$

При выполнении расчетов для каждой из пород получены следующие коэффициенты устойчивости:

$$\mu = 1) 18,1; 2) 6,1; 3) 2,84.$$

Предельные относительные радиусы ЗЗД вокруг горной выработки в разных породах оказались соответственно равными:

$$r_z = 1) 1,24; 2) 2,39; 3) 6,52.$$

Расчет радиальных деформаций проведен при разных размерах ЗЗД по мере ее роста после проведения выработки, т. е. когда границы разрушения пород постепенно сдвигаются в глубь массива. Чтобы определить радиальные смещения, необ-

ходимо деформации умножить на действительный радиус выработки в проходке.

На рисунке 5 даны графики, которые характеризуют развитие деформаций по мере увеличения размеров ЗЗД в песчанике. Как видим, деформации изменяются почти прямо пропорционально размеру радиуса ЗЗД и не превышают в пределах 2,5 %, что свидетельствует о высокой устойчивости выработки, несмотря на то, что породы вокруг нее начали разрушаться, хотя радиус ЗЗД не превысил четверти реального радиуса выработки.

Отметим, что подобного вида графики часто получают в результате обработки данных шахтных инструментальных наблюдений за деформациями пород с помощью глубинных реперов, установленных в скважины, пробуренные из выработки (см., например, [7] и др.).

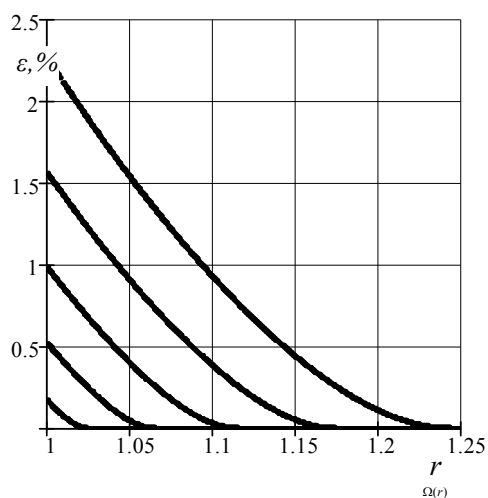


Рисунок 5 Зависимость радиальных деформаций ε , % от относительного радиуса при разных размерах ЗЗД в песчанике

На рисунке 6 приведены аналогичные графики деформаций, когда выработка на той же глубине разработки пройдена в аргиллитах, т. е. в сравнительно слабой породе. Здесь, в отличие от песчаников, деформации достигают почти 50 %, т. е. радиус выработки снижается вдвое, что недопустимо уменьшает поперечное сечение выработки и требует ее перекрепления.

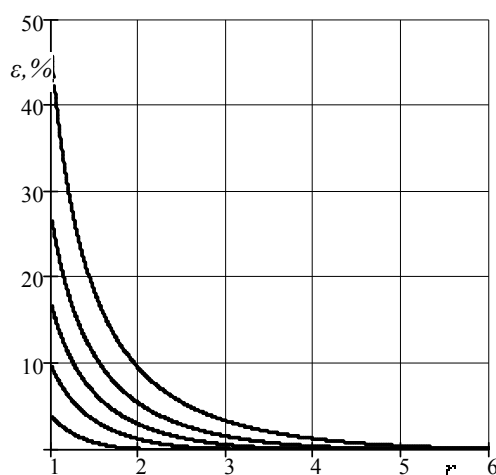


Рисунок 6 Радиальные деформации ε , % при разных размерах ЗЗД в аргиллитах и на разных этапах ее развития

Сопоставление деформаций при разных типах пород в одной и той же выработке можно видеть на рисунке 7. Из него следует, что чем меньше прочностные свойства породы, тем значительнее проявляются деформации, которые к тому же резко нелинейно возрастают по мере приближения к породному контуру.

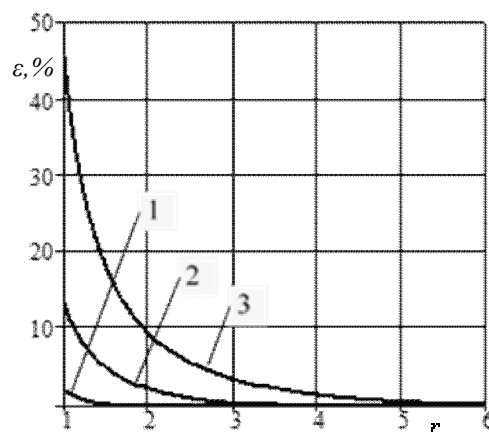


Рисунок 7 Сравнение радиальных деформаций ε , % в разных типах пород:

1 — песчаники, 2 — алевролиты, 3 — аргиллиты

Анализ результатов расчетов и полученных графиков деформаций позволяют заключить, что они достаточно удовлетворительно качественно и во многом количе-

ственно совпадают с данными шахтных наблюдений на замерных станциях [7].

Однако следует заметить, что, несмотря на вполне обнадеживающие результаты, следует для достижения необходимых по точности и представительности результатов прогноза учесть те достаточно важные горно-геологические факторы и процессы, которые на первом этапе не были отражены в исходной расчетной схеме. В первую очередь к таким нерешенным задачам следует отнести кинетику деформирования горных пород во времени, поскольку именно скорость и продолжительность деформирования массива пород во многом определяют выбор и обоснование параметров технологических процессов подземных работ.

Выводы

Выполненные исследования являются логическим продолжением результатов, полученных в предыдущей работе [4] и дополняют их. По сути, они являются таким же «порождающим» решением, как и полученное в работе [4] для напряженного состояния в ЗЗД, но касаются определения деформаций и смещений.

Исследованиями, представленными в данной работе:

- 1) установлено, что вклад в смещения пород вокруг подготовительных выработок от упругих деформаций границы ЗЗД и за счет упругого восстановления пород внутри ЗЗД весьма мал и им можно пренебречь;
- 2) определены закономерности возникновения дилатансии при запредельном

деформировании пород и их постепенном разрушении;

3) впервые даны оценки степени разупрочнения для различных литологических разностей пород при их запредельном деформировании вокруг выработки;

4) получены аналитические зависимости для определения деформаций и смещений пород по всей области ЗЗД вокруг выработки, которые впервые позволяют перейти на физически обоснованные методы прогноза ПГД и резко сузить область применения эмпирических подходов;

5) проведены анализ и оценка погрешностей расчетов смещений и деформаций пород в условиях геометрической нелинейности при использовании мер деформаций Коши и Генки, показано, что вплоть до уровня деформаций 50...60 % ошибка прогноза не превышает 10...15 %;

6) проведен анализ полученных аналитических выражений и даны численные оценки деформаций для типичных в Донбассе литологических разностей пород.

Задачами дальнейших исследований являются изучение кинетики разрушения и деформирования пород вокруг подготовительных выработок, чему будут способствовать ранее полученные «порождающие решения» для ЗЗД. Это позволит перейти к разработке аналитического метода прогноза ПГД с учетом большинства влияющих факторов в реальных горно-геологических условиях.

Библиографический список

1. Строительные нормы и правила СНиП II-94-80. Часть II Нормы проектирования. Глава 94 Подземные горные выработки [Текст]. — М. : Госстрой СССР, 1982. — 30 с.
2. Указания по рациональному расположению, охране и поддержанию горных выработок на угольных шахтах СССР [Текст]. — Л. : ВНИМИ, 1986. — 155 с.
3. Расположение, охрана и поддержание горных выработок при отработке угольных пластов на шахтах [Текст]. — Донецк : УкрНИМИ, 1998. — 163 с.
4. Литвинский, Г. Г. Запредельное поведение пород вокруг горной выработки (порождающее решение) [Текст] / Г. Г. Литвинский // Сб. науч. трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2017. — Вып. 6 (49). — С. 5–14.
5. Вопросы теории горного давления [Текст] // Сб. переводов под ред. проф. П. И. Городецкого, А. А. Борисова. — М. : Госгортехиздат, 1961. — 300 с.

6. Petar Jovanović. *Projektovanje i proračun podgrade horizontalnih podzemnih prostorija* [Текст] / Petar Jovanović. — Beograd : Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta, 1994. — Т. 2. — 316 str.
7. Заславский, Ю. З. Проявления горного давления в глубоких шахтах Донбасса [Текст] / Ю. З. Заславский. — М. : Недра, 1963. — 238 с.
8. Литвинский, Г. Г. Аналитическая теория прочности горных пород и массивов [Текст] / Г. Г. Литвинский. — Донецк : Норд-Пресс, 2008. — 207 с.

© Литвинский Г. Г.

**Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. СПСиШ ДонНТУ Борщевским С. В.,
к.т.н., доц. каф. РМПИ ДонГТУ Мележиком А. И.**

Статья поступила в редакцию 17.10.17.

проф. Литвинський Г. Г. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

СТАТИКА РУЙНУВАННЯ І ДЕФОРМУВАННЯ ПОРІД НАВКОЛО ГІРНИЧОЇ ВИРОБКИ

В даний час визначення деформацій і зсувів порід в гірничу виробку засноване на емпіричних формулах і виконується з недостатньою точністю. Мета досліджень - розробка теоретичних моделей проявів гірського тиску (ПГТ) для визначення його параметрів при утворенні навколо виробки зони поза межних деформацій (ЗПД). Дослідження показали, що дилатансійна компонента деформації є головною і залежить від ступеня втрати породою своєї міцності і суцільності всередині ЗПД. Отримані аналітичні залежності дозволяють прогнозувати ПГТ в статичі, в тому числі і в умовах великих зсувів породного контуру (геометричної нелінійності).

Ключові слова: гірський тиск, гірнича виробка, поза межна поведінка порід, статика деформацій, зона поза межних деформацій, знеміцнення порід, дилатансія, прогноз зсувів, похибки прогнозу, закономірності деформацій.

Prof. Litvinskiy G. G. (DSTU, Alchevsk, LPR)

STATIC OF DESTRUCTION AND DEFORMATION OF ROCK AROUND THE MINE WORKING

At present, finding the deformations and displacements of rocks in the mine workings is based on empirical formulas and is performed with insufficient accuracy. The aim of the research is the development of theoretical models of the manifestations of rock pressure (MRP) for determining its parameters when forming around the zone of ultimate deformations (ZUD). Studies have shown that the dilatancy component of deformation is the main one and depends on the degree the rock lose its strength and continuity within the ZUD. The obtained analytical dependences allow predicting MRP in statics, including conditions of large displacements of the rock contour (geometric nonlinearity).

Key words: rock pressure, development, ultimate behavior of rocks, statics of deformations, zone of ultimate strains, softening of rocks, dilatancy, displacement prediction, forecast error, patterns of deformations.