

УДК 622.831: 622.28

*проф. Литвинский Г. Г.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)*

ЗАПРЕДЕЛЬНОЕ ПОВЕДЕНИЕ ПОРОД ВОКРУГ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ (ПОРОЖДАЮЩЕЕ РЕШЕНИЕ)

Нормативная база по прогнозированию параметров проявлений горного давления заметно устарела и основана на эмпирических закономерностях. Цель исследований — разработка научных положений и теоретических моделей для определения закономерностей горного давления в подземных выработках. Получено порождающее решение задачи об образовании вокруг выработки зоны запредельных деформаций. Впервые запредельное поведение пород учтено введением прочностной неоднородности. Получены базовые теоретические зависимости, исследованы закономерности распределения напряжений вокруг выработки.

Ключевые слова: горное давление, выработка, запредельное поведение пород, прочностная неоднородность, зона запредельных деформаций, распределение напряжений, порождающее решение, параметры разрушения пород.

Горная промышленность Украины находится в глубоком экономическом кризисе и использует устаревшие и неэффективные технику и технологию, которые опираются на примитивную и противоречивую нормативную базу. Более чем 70 % всех горных выработок в Донбассе (а их сооружается свыше 10 км на каждую мегатонну добытого угля) строятся отсталым буровзрывным способом, а приблизительно треть выработок постоянно ремонтируется или полностью перекрепляется. Ежегодные прямые затраты на ремонт и перекрепление горных выработок составляют 20...30 % в себестоимости угля, на эти работы затрачивают десятки тысяч человеко-смен.

Такое состояние проблемы обеспечения безопасности ведения горных работ в значительной мере обусловлено недостаточным использованием научных разработок, особенно для сложных и опасных условий больших глубин, при интенсивных проявлениях горного давления (ПГД), что приводит к потере устойчивости пород, их разрушению и завалам горных выработок. Это в значительной мере вызвано отсутствием научно обоснованных методов прогноза ПГД в выработках, устаревшими и даже ошибочными представлениями о процессах деформирования и разрушения пород, которые

положены в основу ныне действующих нормативов по расчетам поведения горного массива, при обоснованиях параметров крепления и средств охраны выработок. Поэтому проблема противостояния горному давлению при ведении горных работ приобретает все возрастающую актуальность.

Теория горного давления начала развиваться с начала XIX столетия, что было обусловлено первой промышленной революцией и возникшей потребностью промышленности в дешевом энергообеспечении, которое могло быть получено лишь за счет добычи каменного угля. Первые гипотезы ПГД начали оформляться в средние века в работах горных инженеров и ученых-механиков развитых горнодобывающих стран того времени — Англии, Германии, Испании, Франции, Чехии, России и др.

Современное состояние горной геомеханики, предметом которой являются установление закономерностей процессов деформирования и разрушения горных пород при подземном строительстве и добыче полезных ископаемых, нужно признать далеким от удовлетворительного. Более 30 лет не восстанавливается нормативно-методическая литература по расчетам горного давления, которая базируется на нормативных документах СНиП П-94-80 выпуска 1982 года. Научно устарев-

шая нормативно-методическая база, положенная в основу работы проектных и промышленных организаций, включает в себя целый ряд до сих пор неосознанных недоразумений и ошибок, что ведет к угрожающим просчётам и недостоверному прогнозу ПГД и устойчивости выработок.

Таким образом, анализ состояния проблемы свидетельствует о значительном отставании отечественных разработок в этом направлении развития горной науки. В то же время следует отметить, что и зарубежные исследования, в свою очередь, еще не вышли на достаточно удовлетворительный научно-методический уровень решения проблемы. Поэтому перед теорией и практикой обеспечения устойчивости подземных выработок с позиций современного уровня горной геомеханики и геотехники стоят сложные и далеко еще не решенные задачи, особенно при исследовании процессов ПГД.

Разработка научных основ прогнозирования ПГД в капитальных выработках, особенно на больших глубинах, где наиболее сложные условия для их строительства и эксплуатации, обеспечит переход на научно обоснованные методы расчетов и позволит избежать наиболее рискованных ошибок при проектировании и строительстве подземных сооружений. Создание теоретических основ расчетов сложных геомеханических процессов деформирования и разрушения горных пород вокруг капитальных горных выработок позволит изменить устаревшие парадигмы и представления на более современные, создать научную базу для существенного пересмотра действующих нормативных документов и директивных материалов, значительно повысить надежность проектных решений.

Целью данной работы являлась разработка и обоснование научных основ расчетов деформирования и разрушения горных пород вокруг капитальных выработок, установление закономерностей ПГД для повышения надежности проектирования, сооружения и эксплуатации капитальных выработок глубоких шахт.

Идея работы состоит в использовании при рассмотрении ПГД так называемого «порождающего решения», в котором будут отражены самые существенные закономерности формирования ЗЗД. Такого типа решения широко используются в прикладной математике и механике и основаны на применении метода малого параметра. Он представляет собой решение краевых или начальных задач в виде степенных рядов по степеням некоторого малого параметра, входящего в условие задачи в виде заданной физической величины. Как правило, первый член такого степенного ряда и является порождающим решением.

Сформулируем основные требования к порождающему решению для нашей задачи:

- адекватное отражение самых существенных факторов и особенностей развития ПГД;
- абстрагирование от влияния второстепенных факторов, которые могут быть учтены в последующих решениях;
- простота и наглядность полученных аналитических выражений и формул;
- возможность введения новых факторов для учета конкретных горнотехнических условий;
- простота адаптации к реальным горно-геологическим условиям и удобство введения экспериментальных поправок.

В дальнейшем идеализированная модель ПГД в виде порождающего решения должна корректироваться путем учета тех основных влияющих параметров, которые отражают реальную горнотехническую обстановку: некруговая форма выработки, неравномерный отпор крепи, массовые силы в ЗЗД, особенности распределения исходного поля напряжений массива, прочностная неоднородность и анизотропия и др.

До этого времени прогнозирование ПГД проводилось для разных горно-геологических условий по расчетным схемам, мало отвечающим реальным условиям эксплуатации выработок. Предложенный нами подход для рассмотрения сложных процессов перераспределения напряженного состояния

массива горных пород вокруг выработки и процессов его деформирования и разрушения позволит достаточно обоснованно сформулировать пакет порождающих математических моделей, которые можно использовать для описания всего многообразия расчетных схем горного давления.

Горное давление в подземных выработках — один из главных факторов нарушения безопасности работ. На малых глубинах, где концентрация напряжений на породном контуре выработки недостаточна для разрушения пород, либо их разрушение происходило от растягивающих напряжений, опасность представляют отдельные породные вывалы или своды естественного равновесия (рис. 1б), вызванные, главным образом, наличием трещин и ослаблений в горных породах. Такие ограниченные по размерам разрушения пород от бегущих трещин разрыва несложно удержать в равновесии с помощью простых облегченных типов крепи (стойки, легкие крепежные рамы и др.).

С ростом глубины исходное напряжённое состояние массива (рис. 1а) претерпевает серьезные изменения: вертикальная компонента, равная весу вышележащей толщи пород, $\sigma_z = \gamma H$ возрастает пропорционально глубине H , а боковые (горизонтальные) на-

пряжения $\sigma_x = \sigma_y$ составляют лишь часть λ от вертикальных, с глубиной приближаясь к ним. Соотношение между горизонтальными σ_x и вертикальными σ_z напряжениями в нетронутом горном массиве принято называть коэффициентом бокового распора λ :

$$\lambda = \sigma_x / \sigma_z \leq 1. \quad (1)$$

Главной особенностью больших глубин разработки, где $\lambda \approx 1$, является разрушение горных пород вокруг выработок от напряжений сжатия, что приводит к развитию трещин сдвига — вначале вблизи породного контура выработки, а затем их распространению далее в окружающий массив и образованию зоны разрушения и запредельных деформаций (ЗЗД). Такая зона существенно отличается от сводов естественного равновесия тем, что, если не установить крепь с достаточной грузонесущей способностью, разрушение пород будет продолжаться до тех пор, пока выработка не будет полностью раздавлена и заполнена раздробленной массой пород в результате их выдавливания.

Попытки разработать методы расчета параметров ЗЗД делались многими зарубежными и отечественными учеными

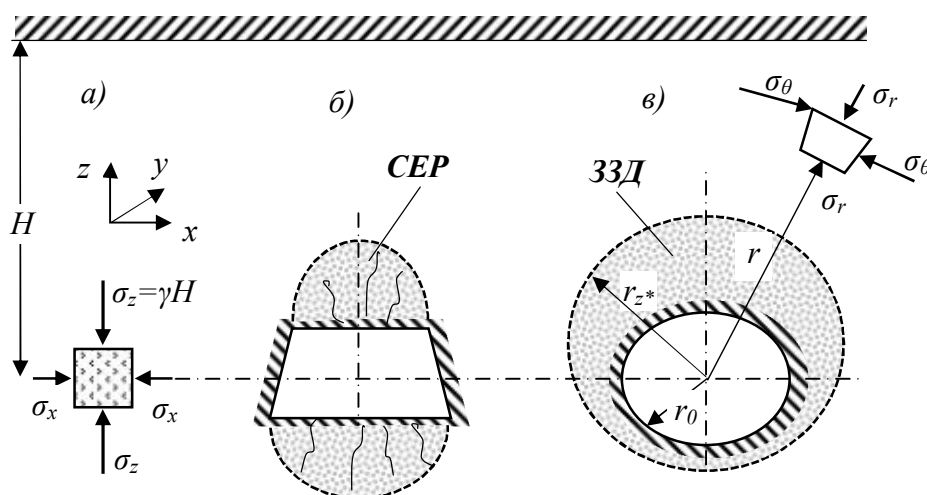


Рисунок 1 Расчетные схемы ПГД вокруг выработки:
а) напряжения в массиве горных пород, б) свод естественного равновесия СЕР,
б) зона запредельных деформаций ЗЗД

начиная с середины прошлого века (Р. Феннер, А. Лабасс, Л. Уокер, Г. Шпакеллер, Ю.М. Либерман, Ю.З. Заславский и др.), подробный анализ их исследований можно найти во многих обзорах [1–4 и др.]. Расчетные формулы, полученные при разных математических моделях массива пород, даны в таблице 1.

Анализ этих моделей показывает, что им присущ общий недостаток — в них не учитывается прочностная неоднородность разрушенных пород в пределах ЗЗД. Для получения порождающего решения по определению размеров зоны запредельных деформаций (ЗЗД) в условиях разрушения

Таблица 1

Расчетные формулы определения параметров ЗЗД вокруг выработки по разным механическим моделям массива горных пород

Модель среды в ЗЗД	Напряжения в ЗЗД $a \leq r \leq r_*$	Радиус ЗЗД r_* и смещения пород u в ЗЗД
1. Сыпучая $F_n = \sigma_\theta - A\sigma_r = 0$ (Р. Феннер)	$\sigma_r = q \left(\frac{r}{a}\right)^{A-1}$ $\sigma_\theta = Aq \left(\frac{r}{a}\right)^{A-1}$	$r_* = a \left[\frac{2p}{(A+1)q} \right]^{\frac{1}{(A-1)}}$ $u = \frac{r}{2G} (p - \sigma_r^*) \left(\frac{r_*}{r}\right)^{A+1}$
2. Идеально-пластичная $F_n = \sigma_\theta - \sigma_r - 2k = 0$	$\sigma_r = q + k \ln \frac{r}{a}$ $\sigma_\theta = q + k \ln \frac{r}{a} + 2k$	$r_* = a \exp \frac{p-k-q}{2-k}$ $u = \frac{p - \sigma_r^*}{2G} \cdot \frac{r_*^2}{r}$
3. Идеально-связная $F_n = \sigma_\theta - A\sigma_r - \sigma_{сж} = 0$ (А. Лабасс)	$\sigma_r = (q+c) \left(\frac{r}{a}\right)^{A-1} - c$ $\sigma_\theta = A(q+c) \left(\frac{r}{a}\right)^{A-1} - c$	$r_* = a \left[\frac{2(p+c)}{(A+1)(q+c)} \right]^{\frac{1}{(A-1)}}$ $u = \frac{p - \sigma_r^*}{2G} r \left(\frac{r_*}{r}\right)^{A+1}$
4. Связная, после разрушения сыпучая $F_n = \sigma_\theta - A\sigma_r = 0$ (проф. Ю.М. Либерман)	$\sigma_r = q \left(\frac{r}{a}\right)^{A-1}$ $\sigma_\theta = A \left(\frac{r}{a}\right)^{A-1}$	$r_* = a \left[\frac{2p - \sigma_{сж}}{(A+1)q} \right]^{\frac{1}{(A-1)}}$ $u = \frac{p - \sigma_r^*}{2G} r \left(\frac{r_*}{r}\right)^{A+1}$

горных пород вокруг выработки с позиций новой математической модели рассмотрим общепринятые для таких задач идеализированные условия: горная выработка круглой формы радиуса r_0 расположена на глубине H . Исходное напряженное состояние массива является гидростатическим, когда все компоненты тензора напряжений равны давлению p вышележащей толщи пород. Так, для произвольно расположенной в массиве декартовой системы координат

x, y, z для напряжений будет соблюдаться равенство: $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = p$,

где p — постоянная, как правило принимаемая равной давлению вышележащей толщи горных пород:

$$p = \gamma H, \text{ Па}, \quad (2)$$

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

На достаточно удаленном расстоянии от забоя выработки (не менее 3...4 радиусов r_0)

массив находится в плоско-деформированном состоянии. Если направить ось z по вертикали, ось y по горизонтали и ось x вдоль оси выработки, то в окрестности выработки деформации пород $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ равны:

$$\varepsilon_x = Const; \varepsilon_y, \varepsilon_z = Var. \quad (3)$$

Введем полярную систему координат r, θ с началом $r=0$ в центре выработки (рис. 1б). Задача заключается в определении напряженно-деформированного состояния пород при образовании зоны запредельных деформаций вокруг горной выработки, на контуре которой установлена податливая крепь с постоянным отпором, равным $q = Const$.

До образования ЗЗД вокруг горной выработки возникает упругое поле напряжений по известному из теории упругости закону (в полярной системе координат r, θ) для области $r_0 \leq r < \infty$:

$$\left. \begin{matrix} \sigma_r \\ \sigma_\theta \end{matrix} \right\} = p \mp (p-q) \left(\frac{r_0}{r} \right)^2; \quad \tau_{r\theta} = 0; \quad (4)$$

где σ_r, σ_θ и $\tau_{r\theta}$ — радиальное, тангенциальное (окружное) и касательное напряжения вокруг выработки. При осевой симметрии нормальные напряжения становятся главными, причем тангенциальное $\sigma_\theta = \sigma_1$ является максимальным, а радиальное $\sigma_r = \sigma_3$ — минимальным.

Если прочность горных пород в массиве окажется меньше действующих напряжений, вокруг горной выработки, возникает ЗЗД, где породы полностью или частично разрушены, т.е. возникает прочностная неоднородность.

Для решения задачи о распределении напряжений σ_r, σ_θ в кольцевой ЗЗД вокруг круглой горной выработки радиуса r_0 , в которой установлена крепь постоянного сопротивления q , необходимо решить систему уравнений:

а) уравнение равновесия в полярной системе координат r, θ при осевой симметрии:

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_r}{r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} &= 0; \\ \tau_{r\theta} &= 0; \quad (r_0 \leq r < r_z), \end{aligned} \quad (5)$$

где r_z — радиус ЗЗД вокруг выработки, подлежащий определению;

б) уравнение состояния (прочности) разрушенной горной породы внутри ЗЗД при $(r_0 \leq r < r_z)$, которое принимаем в виде линейного паспорта прочности:

$$\sigma_\theta = k_\rho \sigma_r + \sigma_c, \quad (6)$$

где σ_c — показатель прочности пород в ЗЗД на одноосное сжатие с учетом масштабного фактора;

k_ρ — коэффициент угла внутреннего трения пород, равный

$$k_\rho = (1 + \sin \rho) / (1 - \sin \rho), \quad 0 \leq k_\rho \leq 3;$$

ρ — угол внутреннего трения пород, град., $0 \leq \rho \leq 30^\circ$.

В подавляющем большинстве случаев при решении подобных задач прочность пород считали постоянной $\sigma_c(r) = Const$. Если принять, что порода в ЗЗД полностью разрушена и близка к сыпучей среде, то $\sigma_c(r) = 0$ и получаем решение Р. Феннера, при $\sigma_c(r) = Const$ получаем решение А. Лабасса, когда среда пластична — решение было получено в задаче А. Галина (табл. 1). Впоследствии, на основании изучения поведения пород при запредельном деформировании, пришло понимание, что на самом деле прочность породы в ЗЗД изменяется вдоль радиуса от минимальной на контуре горной выработки до исходной (ненарушенной) на границе между ЗЗД и упругой зоной.

Вся сложность математической модели о развитии проявлений горного давления вокруг горной выработки состоит в пра-

вильном отражении этой важнейшей закономерности. Этому может способствовать исследование запредельного деформирования горных пород.

Теоретическими и экспериментальными исследованиями запредельного деформирования и разрушения материалов и горных пород доказано, что изменение их прочности на ниспадающей ветви диаграммы полностью контролируется боковым подпором, т.е. минимальной компонентой объемного нагружения [5, 6 и др.].

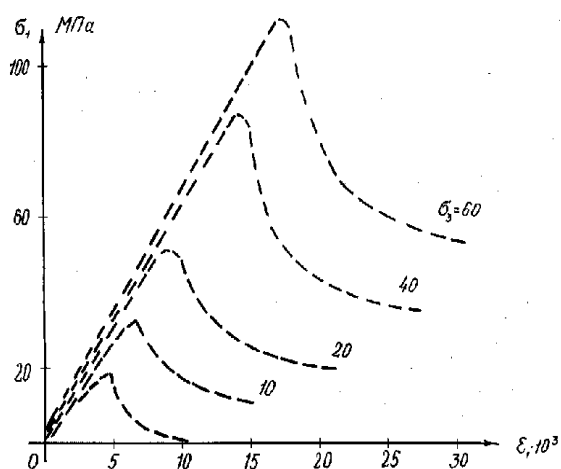


Рисунок 2 Диаграмма испытаний угля при трехосном сжатии (по данным ВНИМИ [5])

Такая закономерность хорошо прослеживается на рисунке 2, где приведены результаты испытаний образцов угля при многокомпонентном нагружении в стабилометре. Графики запредельного поведения угля в координатах «деформация-напряжение» $\varepsilon_1 - \sigma_1$ при разных значениях бокового давления σ_3 показывают прямо пропорциональную зависимость σ_1 от уровня минимального напряжения σ_3 , которую достаточно надежно можно считать линейной.

Поэтому вполне обоснованно можно полагать, что остаточная прочность пород $\sigma_c(r)$ вдоль радиуса r в ЗЗД пропорциональна минимальной компоненте напряженного состояния, т.е. радиальному на-

пряжению σ_r . В первом, достаточно приемлемом приближении вполне допустимо принять эту зависимость линейной:

$$\sigma_c(r) = k_c \sigma_r, \quad (7)$$

где k_c — коэффициент сопротивления пород горному давлению, зависящий от условий разрушения пород внутри ЗЗД и определяемый из граничных условий развития области разрушения пород вокруг горной выработки.

Подставляя (7) в (6), получим искомое уравнение условия прочности пород в ЗЗД:

$$\begin{aligned} \sigma_\theta &= k_p \sigma_r + \sigma_c(r) = k_p \sigma_r + k_c \sigma_r = \\ &= (k_p + k_c) \sigma_r. \end{aligned} \quad (8)$$

После подстановки (8) в исходное дифференциальное уравнение равновесия (5) и его интегрирования с учетом граничного условия (при $r = r_0$, $\sigma_r = q$) получим значения напряжений внутри ЗЗД:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= q \left(\frac{r}{r_0} \right)^\mu, \quad \sigma_\theta = (\mu + 1) q \left(\frac{r}{r_0} \right)^\mu, \\ \tau_{r\theta} &= 0, \quad (r_0 \leq r < r_z), \end{aligned} \quad (9)$$

где $\mu = k_p + k_c - 1$ — коэффициент, учитывающий разрушение и суммирующий влияние коэффициентов k_p , k_c , он показывает степень потери устойчивости породы при развитии ЗЗД вокруг выработки.

Чтобы найти радиус ЗЗД r_z , воспользуемся условием равенства радиальных σ_r и тангенциальных σ_θ напряжений по обе стороны границы ЗЗД $r = r_z$, которые следует определить по уравнениям (4) и (9). После несложных преобразований получим искомую зависимость:

$$r_z = r_0 \left[\frac{2p}{(\mu + 2)q} \right]^{1/\mu} = r_0 \left[\frac{2p - \sigma_c}{(k_p + 1)q} \right]^{1/\mu}. \quad (10)$$

Для определения значения коэффициента возрастания прочности в ЗЗД k_c воспользу-

емся дополнительным условием, требующим, чтобы на границе с упругой областью прочность пород была равна исходному своему значению в массиве, т.е. $\sigma_c(r_z) = \sigma_c = k_c \sigma_r(r_z)$. Используя выражение (10), получим для коэффициента устойчивости k_c и коэффициента разрушения μ :

$$\begin{aligned} k_c &= (k_p + 1) \frac{\sigma_c}{2p - \sigma_c}; \\ \mu &= 2 \frac{(k_p - 1)p + \sigma_c}{2p - \sigma_c}. \end{aligned} \quad (11)$$

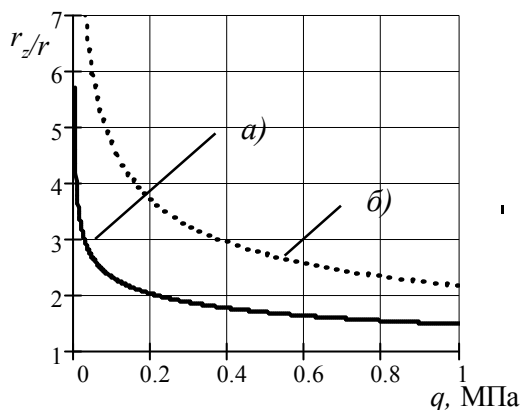


Рисунок 3 Зависимость безразмерного радиуса ЗЗД r_z/r от отпора крепи q для пород с углом трения а) $\rho = 25^\circ$ и б) $\rho = 0^\circ$

Влияние отпора крепи q на радиус ЗЗД r_z/r можно проследить по графикам на рисунке 3, построенным для разных моделей пород: для алевролита с углом внутреннего трения $\rho = 25^\circ$ и, как крайний случай, для сыпучей среды с углом внутреннего трения $\rho = 0^\circ$. Как видно из графиков, влияние отпора крепи на размер ЗЗД по мере его роста резко снижается.

Из (11) можно установить пределы возможного изменения установленных коэффициентов. Так, эти пределы равны: $0 < k_c < \infty$ для коэффициента устойчивости и $k_p + 1 < \mu < \infty$ — для коэффициента разрушения, где нижний предел получен для сыпучей среды $\sigma_c = 0$, а верхний, — при отсутствии ПГД в выработке, — для обоих

случаев одинаков и достигается при $2p - \sigma_c \leq 0$, т.е. когда ЗЗД не образуется.

Для определения распределения напряжений вокруг выработки за пределами ЗЗД при $r > r_z$ воспользуемся известным решением теории упругости о напряжениях в окрестности подкрепленных круглых отверстий. За контур отверстия мы принимаем границу ЗЗД r_z , на которой действует радиальное напряжение σ_{rz} , его определим из ранее полученной зависимости (9) при $r = r_z$. Подставляя (10) в (9), получим для радиального подпора на границе r_z :

$$\sigma_{rz} = q \left(\frac{r_z}{r_0} \right)^\mu = \frac{2p}{\mu + 2} = \frac{2p - \sigma_c}{k_p + 1}, \quad (r = r_z) \quad (12)$$

Подставляя в (4) вместо отпора крепи q значение σ_{rz} из (12) и r_z вместо начального радиуса выработки r_0 , получим искомое распределение упругих напряжений за пределами ЗЗД:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r \\ \sigma_\theta \end{aligned} \right\} = p \left[1 \mp \frac{\mu}{\mu + 2} \left(\frac{r_z}{r} \right)^2 \right]; \quad (13)$$

$$\tau_{r\theta} = 0; \quad (r_z \leq r < \infty).$$

Это распределение напряжений при возрастании радиуса $r \rightarrow \infty$ асимптотически стремится к уровню исходного напряженного состояния массива пород $\sigma_r = \sigma_\theta = p$.

Оказывается, что радиальное напряжение σ_{rz} на границе ЗЗД не зависит от размеров выработки и отпора q установленной в ней крепи. Более того, если из уравнения (9) мы найдем такое значение отпора крепи, при котором ЗЗД не образуется, т.е. $r_z = r_0$, то это будет не что иное, как требуемая величина отпора (грузонесущей способности) идеально жесткой крепи, совпадающая с (12):

$$q_z = \sigma_{rz} = \frac{2p}{\mu + 2} = \frac{2p - \sigma_c}{k_p + 1}, \quad (r_0 = r_z), \quad (14)$$

где q_z — минимальное значение отпора жесткой крепи, устанавливаемой в горной выработке, которое предотвращает возникновение ЗЗД.

Зависимость (14) дает верхнюю теоретическую границу для выбора отпора q податливой крепи в горной выработке. Она зависит только от исходного поля напряжений и коэффициента разрушения μ . Если порода не обладает прочностью, т.е. является идеально сыпучей средой, тогда $k_c = 0$ и $\mu = k_p - 1 = \frac{2 \sin \rho}{1 - \sin \rho}$.

Нижнюю границу отпора для податливой крепи можно считать минимальной грузонесущей способностью q_m , при возникновении ЗЗД она всегда должна быть больше нуля $q_m > 0$ (ее обоснование будет произведено в дальнейших исследованиях). При образовании ЗЗД горная выработка без крепи существовать не может и будет полностью разрушена, т.е. произойдет «завал» выработки.

Таким образом, поставленная задача решена. Ее особенностью является учет постепенного снижения прочности пород (разупрочнения) в ЗЗД по мере приближения к породному контуру горной выработки.

Проанализируем полученные зависимости, для чего сравним результаты расчетов о развитии ЗЗД вокруг выработки при изменении исходных данных. В качестве примера для сравнения примем типичные горно-геологические условия: выработка круглого поперечного сечения с радиусом в проходке 2 м пройдена на глубине 1000 м по алевролитам со средней прочностью на одноосное сжатие с учетом масштабного эффекта $\sigma_c = 30$ МПа и углом внутреннего трения $\rho = 25^\circ$. В результате получаем:

$$p = \gamma H = 25 \cdot 1000 = 25000, \frac{\text{кН}}{\text{м}^2};$$

$$k_p = (1 + \sin 25) / (1 - \sin 25) = 2,5;$$

$$k_c = (k_p + 1) \frac{\sigma_c}{2p - \sigma_c} = (2,5 + 1) \frac{30}{50 - 30} = 5,25;$$

$$\mu = 2 \frac{(2,5 - 1)25 + 30}{50 - 30} = 3,37.$$

Закономерности изменения радиальных и окружных напряжений внутри и вне ЗЗД можно проследить по графикам на рисунках 4 и 5.

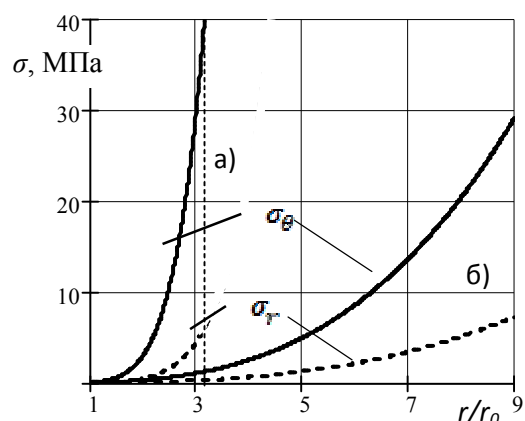


Рисунок 4 Графики радиальных и окружных напряжений в ЗЗД для пород с углом внутреннего трения а) $\rho = 25^\circ$ и б) $\rho = 0^\circ$

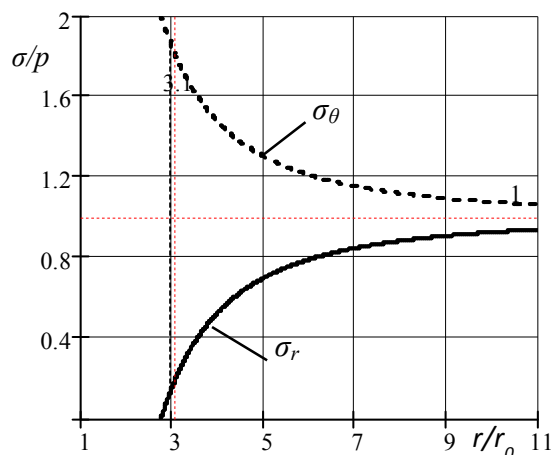


Рисунок 5 Графики радиальных и окружных упругих напряжений вне ЗЗД согласно (13)

На рисунке 4 даны графики распределения радиальных (штриховые линии) и окружных (сплошные линии) напряжений внутри ЗЗД для двух случаев: когда ЗЗД образуется в алевролитах (угол внутреннего

трения $\rho = 25^\circ$) и когда порода внутри ЗЗД разрушается вплоть до квазисыпучего состояния (угол внутреннего трения $\rho = 0^\circ$). Сопоставление графиков показывает, что учет прочностной неоднородности приводит к снижению относительного радиуса распространения ЗЗД примерно в три раза. Следовательно, и интенсивность ПГД в выработке окажется меньше в несколько раз.

Представление о законе распределения радиальных и окружных напряжений в упругой области за пределами ЗЗД можно получить по графикам рисунка 4. Напряжения асимптотически по мере удаления от выработки при увеличении безразмерной радиальной координаты r/r_0 устремляются к значению исходного напряженного состояния p массива горных пород.

Выводы

Анализ развития методов расчета проявлений горного давления в подземных выработках показал необходимость пересмотра существующей нормативной доку-

ментации на основании новых математических моделей ПГД. Для этого было предложено порождающее решение, правильно учитывающее основные влияющие параметры и впервые – прочностную неоднородность в области запредельного деформирования горных пород. Исследованы закономерности распределения напряженного состояния пород вокруг выработки и влияние на него основных факторов – отпора крепи, прочности пород, угла внутреннего трения и др.

Полученные теоретические зависимости в виде порождающего решения могут лечь в основу новых расчетных методов ПГД. Предложенное порождающее решение впервые открывает путь для обоснованного учета основных факторов, влияющих на ПГД в выработке (анизотропия поля напряжений в массиве пород, неравномерный отпор крепи, прочностная анизотропия, массовые силы в разрушенных породах и пр.).

Библиографический список

1. Вопросы теории горного давления [Текст] / сб. переводов под ред. проф. П. И. Городецкого, А. А. Борисова. — М. : Госгортехиздат, 1961. — 300 с.
2. Jovanović Petar. Projektovanje i proračun podgrade horizontalnih podzemnih prostorija T 2. [Текст] / Petar Jovanović. — Beograd : Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta, 1994. — 316 str.
3. Заславский, Ю. З. Проявления горного давления в глубоких шахтах Донбасса [Текст] / Ю. З. Заславский. — М. : Недра, 1963. — 238 с.
4. Tajduś Antoni. Geomechanika w budownictwie podziemnym. Projectowanie i budowa tuneli [Текст] / Antoni Tajduś, Marek Gała, Krzysztof Tajduś. — Krakow : Akademia AGH, 2012. — 762 s.
5. Ставрогин, А. Н. Механика деформирования и разрушения горных пород [Текст] / А. Н. Ставрогин, А. Г. Протосеня. — М. : Недра, 1992. — 224 с.
6. 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 зав. каф. СПСиШ ДонНТУ, д.т.н., проф. Борщевским С. В.

Статья поступила в редакцию 22.06.17.

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

ПОЗАМЕЖНА ПОВЕДІНКА ПОРІД НАВКОЛО ГІРНИЧОЇ ВИРОБКИ (ПОРОДЖУЮЧЕ РІШЕННЯ)

Нормативна база щодо прогнозування параметрів проявів гірського тиску помітно застаріла і заснована на емпіричних закономірностях. Мета досліджень — розробка наукових положень і теоретичних моделей для визначення закономірностей гірського тиску в підземних ви-

бках. Отримано породжуюче рішення задачі про зону поза межних деформацій навколо виробки. Вперше поза межню поведінку порід враховано введенням неоднорідності. Отримано базові теоретичні залежності, досліджено закономірності розподілу напружень навколо виробки.

Ключові слова: гірський тиск, виробка, поза межня поведінка порід, неоднорідність міцності, зона поза межних деформацій, розподіл напружень, породжуюче рішення, параметри руйнування порід.

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

POST ULTIMATE BEHAVIOR OF ROCK MASS AROUND MINE WORKINGS (GENERATING SOLUTION)

Regulatory framework for forecasting parameters of the rock-pressure distinctly was outdated and are based on empirical laws. The goal of the research is development of scientific provisions and theoretical models to determine the rock pressure regularities in underground mines. The generating solution of the problem of formation around the mine working ultimate deformations is obtained. For the first time, structural heterogeneity of the strength of rock was taken into account. The basic theoretical relationships were obtained, the regularities of distribution of stresses around the mine working were investigated.

Key words: rock pressure, mine working, ultimate behavior of rocks, strength heterogeneity, ultimate deformations, stress distribution, the generating solution, parameters of rocks destruction.