

*д.т.н., проф. Бабиюк Г.В.,
ассистент Диденко М.А.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ПРИЗАБОЙНОЙ ЧАСТИ ВЫРАБОТКИ

Наведені результати просторового моделювання розподілу напружень навколо торця гірничої виробки круглої й квадратної форм поперечного перерізу.

Устойчивость горных выработок, особенно проводимых в сложных горно-геологических условиях, в первую очередь зависит от достоверности прогнозирования проявлений горного давления в начальный момент их существования, т.е. до вступления крепи во взаимодействие с породным обнажением. Адекватное отображение состояния породного массива в зоне влияния забоя выработки при её проведении можно получить лишь при учете перераспределения исходного поля напряжений, обусловленного образованием полости. В этом случае описание геомеханических процессов возможно только с использованием трехмерной модели, так как условие плоской деформации вблизи забоя выработки выполняется. Однако решение объемной численной задачи отличается значительными сложностями из-за трудоемкости конструирования сети конечных элементов, роста времени вычислений и усложнения обработки и корректировки результатов математического моделирования, и поэтому оно не пригодно для использования при оперативном прогнозировании геомеханических процессов.

С достаточной для практики точностью воспроизвести процессы деформирования и разрушения породного массива в призабойной части выработки можно путем замены пространственной задачи о формировании зоны разрушения вокруг выработки рядом последовательно решаемых плоских, когда начальные и граничные условия на каждом последующем шаге задаются исходя из решения задачи на предыдущем шаге [1]. Однако при этом возникает необходимость в корректировке граничных условий, чтобы обеспечить соответствие между проявлениями горного давления, получаемыми из решения псевдопространственной задачи, и проявлениями, которые реализуются при объемной расчетной схеме.

Расчетная схема фрагмента массива вблизи забоя горной выработки приведена на рис. 1, где граничные условия для напряжений записываются следующим образом:

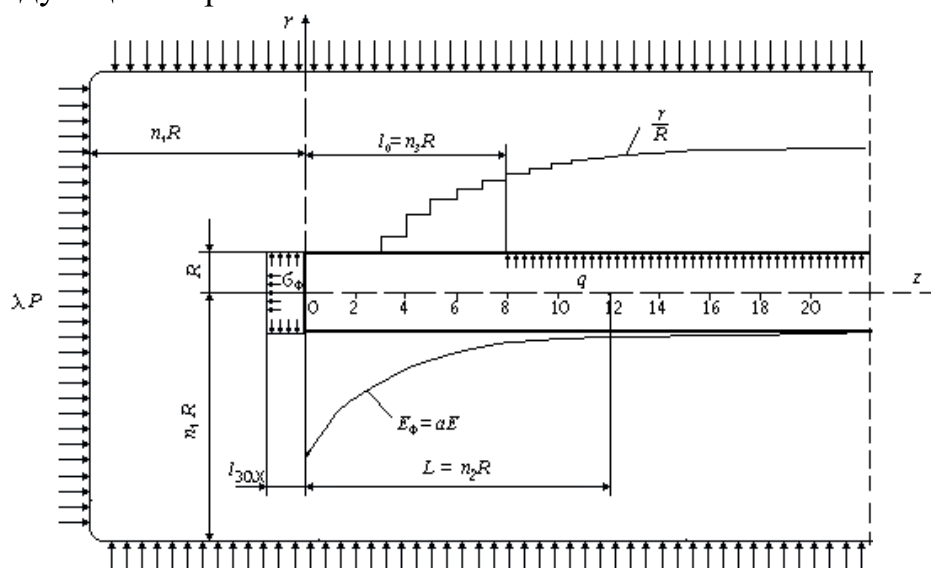


Рисунок 1 – Расчетная схема фрагмента массива вблизи забоя выработки

на внутреннем контуре выработки –

$$\begin{aligned} \sigma_r &= 0 \text{ при } r = R \text{ и } x < l_0 = n_3 \cdot R; \\ \sigma_r &= q \text{ при } x \geq l_0; \\ \sigma_x &= 0 \text{ при } 0 \leq r \leq R \text{ и } x = 0; \end{aligned} \quad (1)$$

в глубине породного массива –

$$\begin{aligned} \sigma_z &= P \text{ при } n_1 \cdot R \geq z \geq -n_1 \cdot R \text{ и } x \geq n_1 \cdot R; \\ \sigma_y &= \lambda \cdot P \text{ при } n_1 \cdot R \geq z \geq -n_1 \cdot R \text{ и } x \geq n_1 \cdot R; \\ \sigma_x &= \lambda \cdot P \text{ при } x \leq -n_1 \cdot R, \end{aligned} \quad (2)$$

где q – отпор крепи;

l_0 – расстояние от забоя выработки до массива, где начинается силовое взаимодействие крепи с породным обнажением;

n_1, n_2, n_3 – целые числа, указывающие на кратность радиусу выработки R .

Главная особенность построения плоской численной модели в зоне влияния забоя выработки состоит в имитации изменчивости начального поля напряжений. Эти изменения обусловлены тем, что напряжения, воспринимавшиеся породой в пределах будущей полости, перераспределяются в глубину массива. Это перераспределение происходит не

мгновенно, а постепенно (при буровзрывной технологии скачкообразно) в некоторой области, называемой обычно зоной влияния забоя, и характеризуются протяженностью. В пределах этой зоны условие плоской деформации $\varepsilon_x = 0$ не соблюдается, поэтому поле напряжений является переменным и может быть представлено в виде безразмерной функции $f(L / R)$ от расстояния до забоя и времени существования выработки.

Исследовано три способа имитации перераспределения исходного поля напряжений.

В первом случае для учета влияния забоя к контуру выработки на участке $0 \leq x \leq L$ прикладывались фиктивные напряжения σ_ϕ , равные при $x = 0$ «снимаемым» напряжением по И.В. Родину [2], но противоположные по знаку, и постепенно снижающиеся до нуля на расстоянии $x = L$ от забоя выработки. Однако имитация переменного поля напряжений в призабойной части выработки путем задания фиктивной радиальной нагрузки на поверхности полости нарушает граничные условия $\sigma_r = 0$ при $x < l_0$ и предполагает знание распределения напряжений по периметру будущей выработки, которые зависят от многих факторов, в том числе от неизвестного коэффициента бокового распора.

Второй способ состоял в заполнении выработки фиктивным материалом, модуль деформации E_ϕ которого определялся по отношению к модулю упругости ненарушенной породы из выражения:

$$E_\phi = \alpha \cdot E, \quad (3)$$

где α – функция, задающая закон изменения поля напряжений в призабойной части выработки и зависящая от формы и размеров поперечного сечения, исходного поля напряжений, прочности пород и технологии горнопроходческих работ.

Для выработки круглого поперечного сечения функция α была принята в виде экспоненциальной зависимости:

$$\alpha = e^{-z/mR}, \quad (4)$$

где m – параметр аппроксимации.

При $n_2 = 12$ параметр $m = 2$, т.е. на расстоянии $x = 12R$ от забоя модуль E_ϕ практически равен нулю, а граничные условия близки к плоской деформации. Однако выработки сооружаются, как правило, в неоднородном и анизотропном массиве, поэтому их модуль упругости не постоянная величина. Кроме того, в данном случае также нарушается граничное условие при $x < l_0$.

В условиях неопределенности исходного поля напряжений наиболее приемлемым способом моделирования геомеханических процессов

в зоне влияния забоя выработки является применение на внешней поверхности модели фиктивной нагрузки, определяемой как:

$$P_{\phi} = f(L/R) \cdot P, \quad (5)$$

где P_{ϕ} – фиктивная компонента напряжений, прикладываемая на контуре расчетной области на расстоянии $x \leq |L|$ от забоя.

При $x \geq |L|$ параметр $f(L/R) = 1$, т.е. деформирование и разрушение пород происходит в постоянном поле напряжений; при $x < -L$, т.е. впереди забоя, параметр $f(L/R) > 1$; при $x < L$, т.е. позади забоя, параметр $f(L/R) < 1$. Следовательно, при таком подходе не соблюдается граничное условие на внешней поверхности модели (2). Однако, учитывая то, что до сих пор в геомеханике [3] исходное напряженное состояние массива задается на основании той или иной гипотезы, данное допущение не ведет к увеличению числа степеней свободы системы и не вносит существенных искажений в общую картину зарождения и формирования зон разрушения вокруг выработки. Более того, увязка результатов расчета с данными шахтных замеров путем корректировки параметра $f(L/R)$ дает возможность использовать плоскую упругую пластическую модель в призабойной части выработки.

Установление вида функции влияния забоя на напряженное состояние пород осуществлялось путем анализа пространственного распределения напряжений вокруг забоя выработок круглого и квадратного поперечного сечения, полученного с помощью математического моделирования на ПЭВМ методом конечных элементов [4]. Расчетные схемы для решения задачи приведены на рис. 2. Упругий и невесомый фрагмент породного массива для воспроизведения поля напряжений нагружали за пределами зоны влияния выработки внешней нагрузкой, имитирующей действие отброшенных пород. Ввиду наличия двух плоскостей симметрии, моделировалась четверть исследуемой области, причем начало общей системы координат (x, y, z) помещено в плоскости забоя выработки, а ось x совмещена с ее продольной осью.

Конечно-элементная структура численной модели для выработки круглого поперечного сечения сложена 2670 конечными элементами и 3208 узлами, а для выработки квадратного поперечного сечения – 5357 конечными элементами 6373 узлами. В местах высоких градиентов напряжений сетка сгущена, причем степень дискретизации расчетной области повышалась постепенно до тех пор, пока изменения поля напряжений вблизи забоя стали несущественными. Размер расчетной области в поперечном направлении назначен равным шести радиусам выработки ($6R$), а в продольном – десяти ($10R$). Для модели с квадратной формой поперечного сечения выработки линейные размеры устанавливались по

отношению к условному радиусу R_y , связанному с площадью поперечного сечения выработки соотношением $R_y = \sqrt{S/\pi}$. Площадь поперечного сечения выработки различной формы была принята постоянной, а забой помещался в середине расчетного фрагмента, чтобы вызванные забоем возмущения в распределении напряжений затухали к торцам моделей.

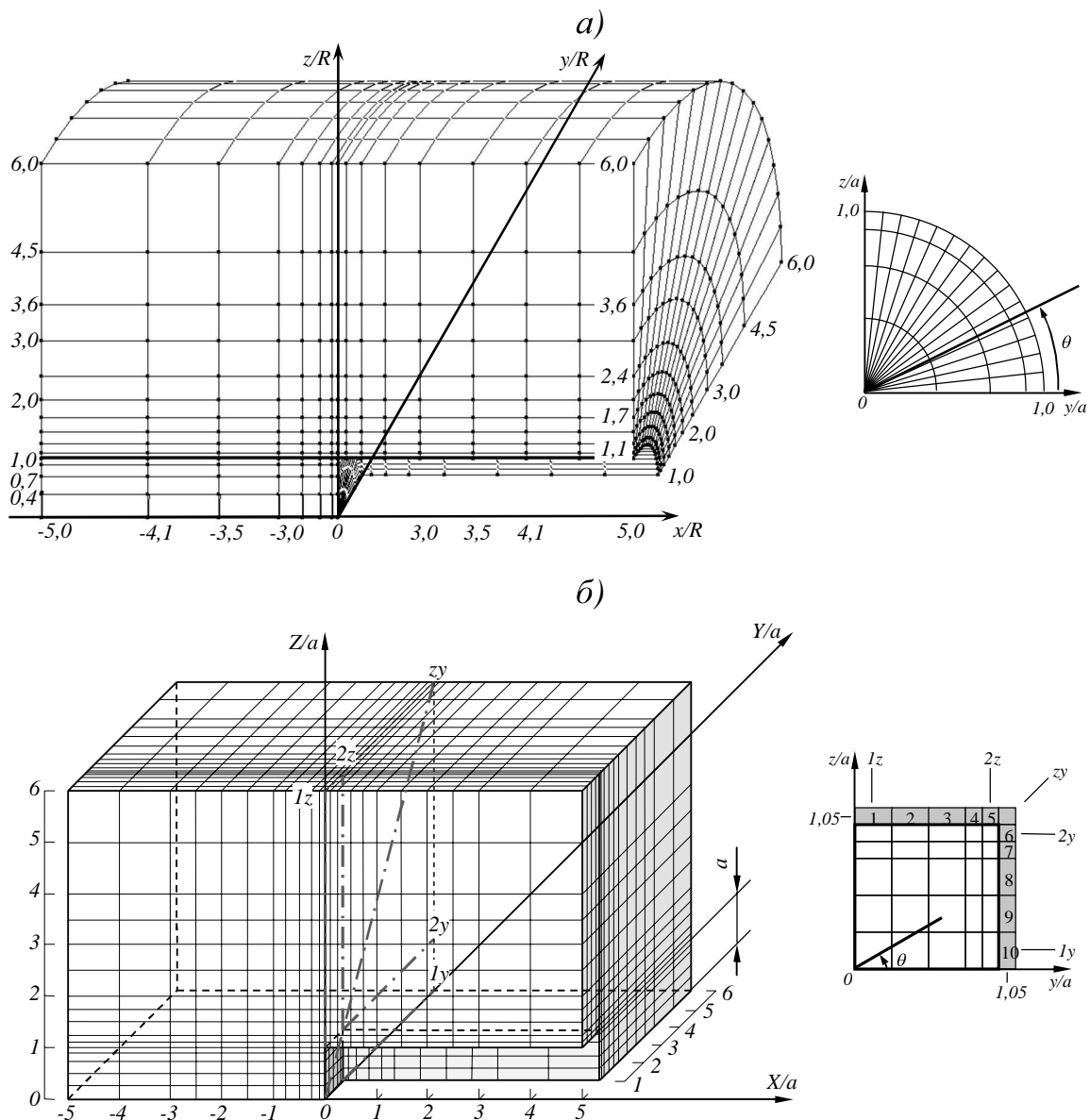


Рисунок 2 – Расчетные схемы к решению объемных задач для выработок круглой (а) и квадратной (б) форм поперечного сечения

Внешнее нагружение модели производилось нормированными условными силами, определяемыми в соответствии с задаваемым соотношением λ между боковой P_y и вертикальной P_z нагрузками ($0 \leq \lambda \leq 1$). Компонента исходных напряжений по вертикальной оси принята равной

единице, а по горизонтальной y – коэффициенту λ . При такой нагрузке в случае необходимости легко переходить от коэффициентов концентрации к реальным величинам напряжений путем умножения на вертикальную компоненту исходного поля $P_z = \gamma H$. Модуль упругости при определении деформаций также выражался в безразмерном виде $E/P_z = 1000$. Граничные условия на поверхностях симметрии и торцах фрагмента заданы таким образом, чтобы исключалось перемещение узлов перпендикулярно к ним, тогда продольные начальные напряжения P_x на торцах модели связаны с основными влияющими факторами зависимостью:

$$P_x = P_z(1 + \lambda) \cdot \nu, \quad (6)$$

где ν – коэффициент Пуассона, $\nu = 0,25$.

Расчет производился с помощью программы «Ли́ра-9» (НИИАСС Украины) [5], а результаты численного решения представлялись в виде табличных данных и графиков распределения напряжений в элементах и перемещений узлов в характерных продольных и поперечных сечениях, а также по контуру выработки на различном расстоянии от забоя.

Для суждения о внешнем виде функции влияния забоя следует проанализировать закономерности изменения вдоль выработки разности главных напряжений ($\sigma_1 - \sigma_3$), определяющей в соответствии с теорией прочности Мора предельное состояние пород. Изменение разности коэффициентов концентрации главных напряжений $\Delta = k_{\sigma_1} - k_{\sigma_3}$ для круглого поперечного сечения выработки демонстрируется на рис. 3 в двух характерных точках контура, т.е. в боках (рис. 3, а) и кровле (рис. 3, б) выработки, а для квадратного в четырех характерных точках, а именно: в боках (рис. 4, а) и кровле (рис. 4, б) по осям симметрии, а также в боках (рис. 5, а) и кровле (рис. 5, б) вблизи угла выработки.

Вдоль выработки цилиндрической формы при приближении к забою со стороны нетронутого массива разность коэффициентов концентрации напряжений Δ в районе боков будущей выработки при всех значениях λ монотонно возрастает в результате передачи напряжений от вышележащей толщи через опережающий забой массив. В плоскости забоя градиент изменения напряжений достигает максимума, а вогнутость зависимости (рис. 3, а) плавно переходит в выпуклость, после чего изменение разности начинает убывать, а главные напряжения стремятся к своему пределу вне зоны влияния забоя. При этом доля прироста напряжений впереди забоя доходит до 40% от всего диапазона изменения параметра Δ , а разрушение в опережающем массиве может зародиться

в условиях обобщенного сжатия при значениях параметра Надаи-Лоде $\mu_\sigma = -(0,1 \dots 0,8)$.

В кровле круглой выработки (рис. 3, б) кривые изменения разности коэффициентов концентрации главных напряжений ведут себя по-разному в зависимости от λ . При напряженном состоянии, близком к гидростатическому, они подобны вышерассмотренным в боках выработки, а при малых значениях λ зависимости имеют совершенно иной вид. Первоначальный рост разности главных напряжений Δ в зоне опорного давления впереди забоя свидетельствует о передаче напряжений, вызванных образованием полости, перед забоем. Однако в пределах первой заходки разность главных напряжений резко снижается, главные площадки разворачиваются, так как напряжения теперь передаются через боковые стенки выработки, а в кровле (почве) выработки формируется зона разгрузки, где при $\lambda < 0,33$ на контуре $\sigma_1 = 0$, а σ_2 и σ_3 принимают значения меньше нуля, что соответствует условию обобщенного растяжения.

В общем, для выработки с квадратной формой поперечного сечения имеют место те же закономерности изменения вдоль выработки разности главных напряжений Δ , что и для выработки круглой формы. Локальные отличия объясняются особенностями породного контура, т.е. наличием углов и плоских участков. При подходе к забою разность Δ монотонно возрастает при всех значениях коэффициента бокового распора λ как в боках (рис. 4, а) так и в кровле (рис. 4, б) выработки. Вблизи угла (5-й и 6-й элементы на рис. 2, б) в плоскости забоя вогнутость кривых плавно переходит в выпуклость (при $0 \leq \lambda \leq 0,3$ с небольшим скачком), а далее вдоль выработки значения Δ , затухая, продолжают возрастать, стремясь к своему пределу вне зоны влияния забоя. При этом доля прироста напряжений впереди забоя составляет порядка 30%, причем весь диапазон изменения параметра при $\lambda = 1$ составляет $0 \leq \Delta \leq 3,1$, а при $\lambda = 0$ – $1,0 \leq \Delta \leq 2,6$.

В боках выработки (10-й элемент на рис. 2, б) плавный переход вогнутости кривой в выпуклость наблюдается при $0 \leq \lambda \leq 0,3$. В остальных случаях, а в 1-м элементе кровли выработки при всех значениях λ , в плоскости забоя отмечается резкий скачок разности главных напряжений, максимальная величина которого ($\Delta = 2,4$) в 1-м и 10-м элементах соответствует гидростатическому напряженному состоянию ($\lambda = 1$).

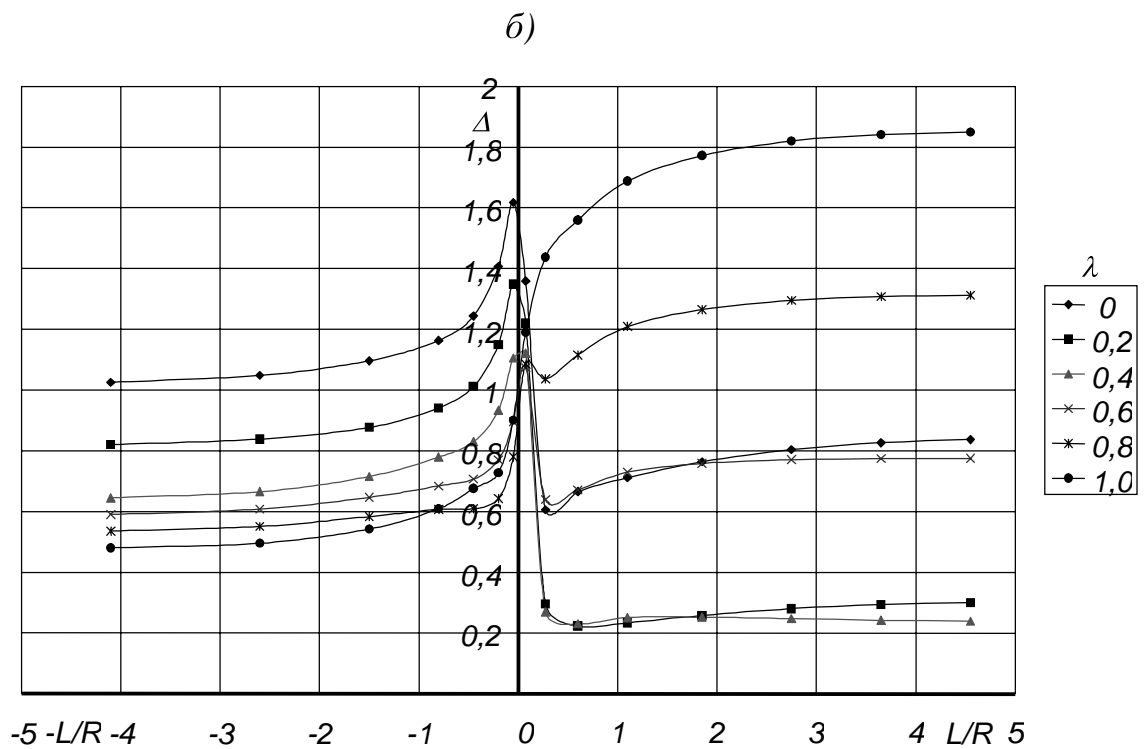
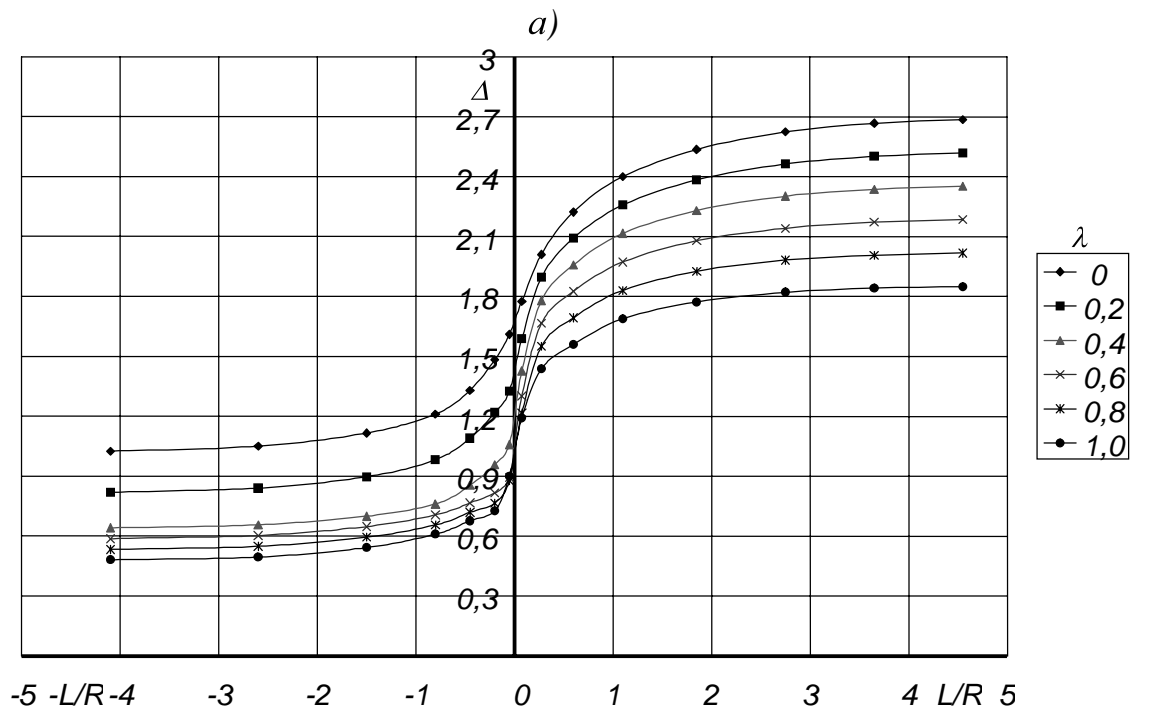


Рисунок 3 – Распределение разности коэффициента концентрации главных напряжений Δ для круглой выработки вдоль продольной оси в боках (a) и кровли (б) при различных значениях λ

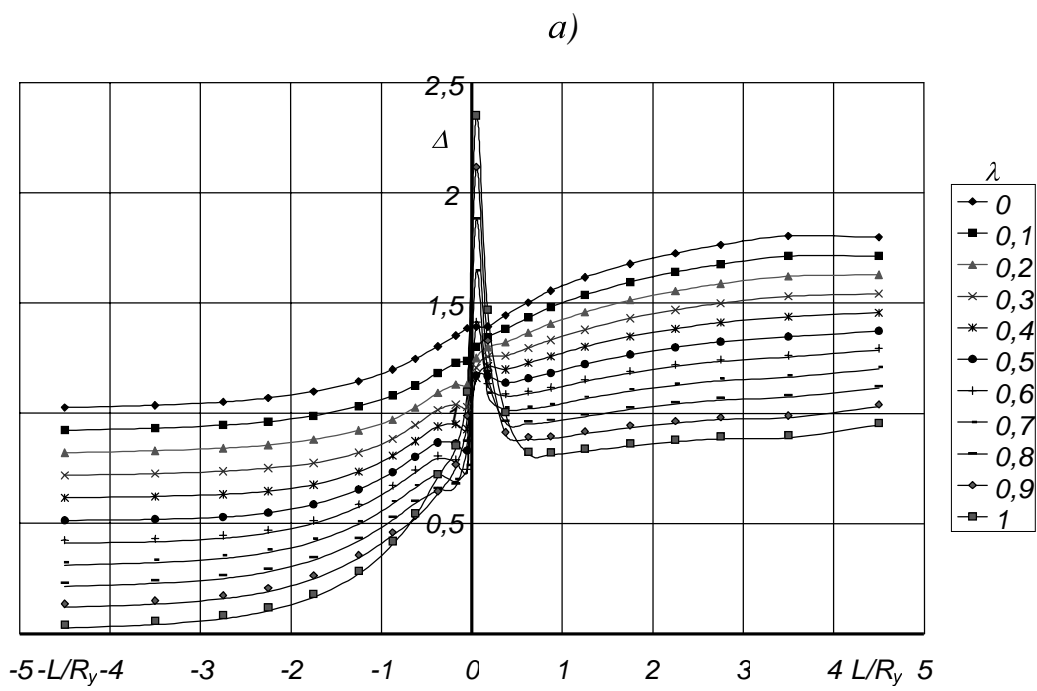


Рисунок 4 – Распределение разности коэффициента концентрации главных напряжений Δ для квадратной выработки вдоль продольной оси посередине боков (a) и кровли (б) при различных значениях λ

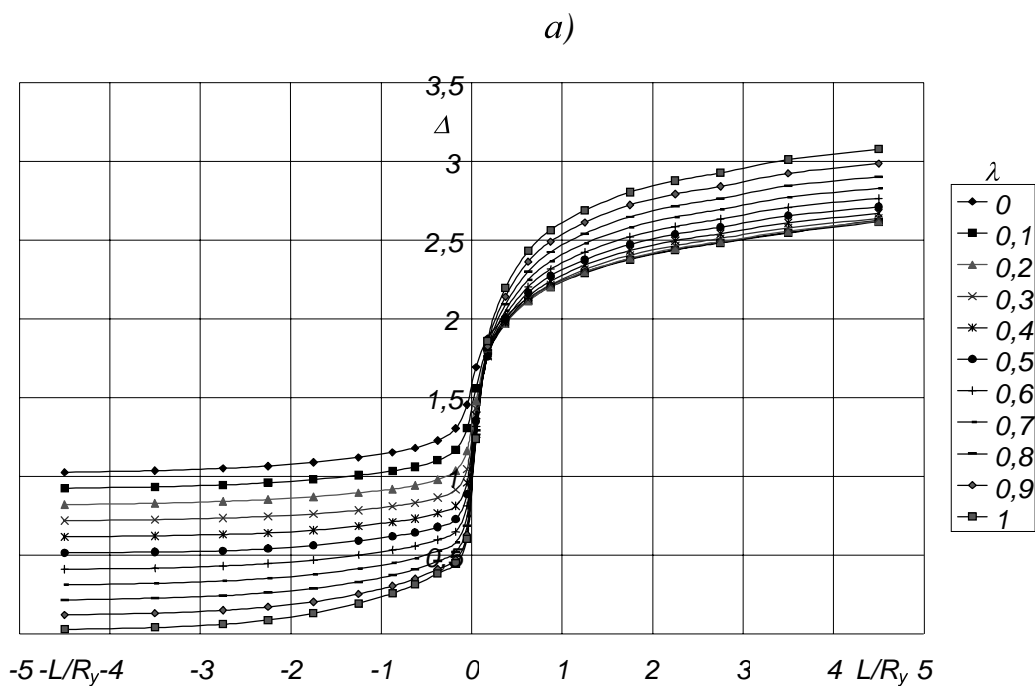


Рисунок 5 – Распределение разности коэффициента концентрации главных напряжений Δ для квадратной выработки вдоль продольной оси в боках (a) и кровле (б) вблизи углов при различных значениях λ

В пределах первой заходки ($x < 0,5a$), после достижения максимума, величина разности коэффициентов концентрации главных напряже-

ний Δ быстро снижается, например, в 1-м и 10-м элементах при $\lambda = 1$ до $\Delta = 0,8$. Вследствие плоского контура выработки в кровле (почве) формируется зона разгрузки, где при $x < 0,5$ максимальное главное напряжение $\sigma_1 \approx 0$, а другие компоненты напряжений σ_2 и σ_3 имеют значения меньше нуля. При этом максимальное снижение разности главных напряжений в кровле выработки происходит при $0,4 \leq \lambda \leq 0,5$. Далее с удалением от забоя разность коэффициентов концентрации главных напряжений Δ возрастает, причем в кровле (1-й элемент) лишь при $\lambda > 0,8$ её величина на контуре выработки превышает аналогичное значение в массиве до проведения выработки.

Таким образом, в плоскости забоя квадратной выработки разность главных напряжений ($\sigma_1 - \sigma_3$) в кровле (1-й элемент) и в боках (10-й элемент) превышает аналогичную величину, характерную для удаленных от забоя поперечных сечений выработки. Следовательно, в однородных и изотропных породах разрушение пород от сжатия в кровле и боках квадратной выработки вблизи её забоя является, зачастую, первичным, что способствует формированию более устойчивого к последующим изменениям формы контура состояния и уменьшает роль угла в формировании нового поля напряжений. В слоистых породных массивах, где прочность пород в связи с наличием поверхностей ослабления уменьшается, разрушение в кровле (почве) является ещё более вероятным. Поэтому ещё до попадания пород кровли (почвы) в зону разгрузки они могут быть ослаблены в опорной зоне впереди забоя, где наблюдается высокая концентрация главных напряжений и наибольшее значение их разности ($\sigma_1 - \sigma_3$).

Анализ распределения напряжений в окрестности забоя выработок различной формы поперечного сечения показал, что перераспределение исходного поля напряжений при сооружении выработки сплошным забоем в упругом породном массиве практически ограничивается областью, удаленной от забоя на расстояние $5R_y$. При этом вдоль выработки в пределах зоны влияния забоя можно выделить три характерных участка: возрастания напряжений впереди забоя вследствие действия опорного давления с максимальной концентрацией в торцовом сечении выработки; скачкообразного изменения поля напряжений и разворота площадок главных напряжений в результате образования полости; постепенного роста напряжений (по модулю) на контуре выработки за её забоем до стабилизации поля в условиях плоской деформации.

Напряженное состояние породного массива вблизи забоя выработки с необходимой достоверностью определяется безразмерной функцией влияния забоя $f(L/R_y)$, которая является множителем к компонентам начального поля напряжений при решении плоских задач и впе-

реди забоя, независимо от формы выработки, изменяется по нелинейной зависимости от единицы ($f = 1$) до величины коэффициента опорного давления $f = k$, в плоскости забоя имеет скачек в результате образования полости, а позади забоя постепенно возрастает по экспоненциальной зависимости от $f = 0,4-0,5$ до единицы в условиях плоской деформации.

Приведены результаты пространственного моделирования распределения напряжений вокруг торца горной выработки круглой и квадратной форм поперечного сечения.

The volumetric stress distribution around the face of circular and square mine working is simulated with finite elements method. Results of computer simulation are shown in this article.

Библиографический список

1. Бабюк Г.В. Моделирование геомеханических процессов в зоне влияния забоя горной выработки // Сб. научн. статей II-й междунар. конф. «Проблемы и перспективы освоения подземного пространства крупных городов.» – Днепропетровск: НГА Украины, 1997. – С.92-95.

2. Родин И.В. Снимаемая нагрузка и горное давление / В кн.: Исследования горного давления. – М.: Госгортехиздат, 1960. – С.343-374.

3. Баклашов И.В., Картозия Б.А. Механика горных пород. – М.: Недра, 1975. – 271с.

4. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 221с.

5. Лантух-Лященко А.И. Лира. Программный комплекс для расчета и проектирования конструкций: Учебное пособие. – К.-М.: 2002. – 312с.