

ЗАВИСИМОСТЬ ОБЪЕМНОЙ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД В ОКРЕСТНОСТИ ПОДЗЕМНОЙ ВЫРАБОТКИ ОТ ЕЁ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

д.ф.-м.н. Журавков М.А., д.ф.-м.н. Щербаков С.С., асп. Шемет Л.А.

Белорусский государственный университет, Минск

Введение. Процессы разрушения массивов горных пород в окрестности подземных выработок имеют сложный характер, но в подавляющем большинстве случаев связаны с образованием новых и развитием существующих систем трещин. Вокруг подземных горных выработок могут возникать области, в которых действуют одновременно по разным направлениям сжимающие и растягивающие напряжения. Зачастую именно эти зоны и определяют места образования и топологию потенциальных областей возможных разрушений в окрестности контура выработок [1, 2].

Интегральную оценку объемной повреждаемости зон возможных разрушений в массивах горных пород целесообразно проводить на основе модели деформированного твердого тела с опасным объемом [3, 4] в зависимости от формы поперечного сечения выработки, глубины ее залегания и других параметров.

В работе представлен подход к определению объемной повреждаемости в окрестности контура подземной горной выработки на основе модели деформированного твердого тела с опасным объемом. Опасные объемы являются интегральными показателями абсолютной повреждаемости тела, содержащими сведения, как о напряженно-деформированном, так и предельном состоянии.

Опасный объем (площадь) в массиве горных пород с выработкой. Объектом исследования являлся массив горных пород с выработками арочной, прямоугольной и круглой форм поперечного сечения.

На рисунке 1 представлены расчетные схемы с выработками различной формы поперечного сечения, но имеющими одинаковую площадь поперечного сечения $S_{pr} = 32,13 \text{ м}^2$.

Геометрические характеристики и свойства материала были приняты следующими: $H=100 - 600 \text{ м}$, $R=3 \text{ м}$, $R_c=3,2 \text{ м}$, $a=6 \text{ м}$, $b=5,355 \text{ м}$, $g=9,8 \text{ м/с}^2$, $\rho=2300 \text{ кг/м}^3$, $E=1,75 \cdot 10^9 \text{ Па}$, $\nu=0,28$, $\sigma_{сж}^{\text{lim}}=25,2 \text{ МПа}$, $\sigma_p^{\text{lim}}=1,8 \text{ МПа}$.

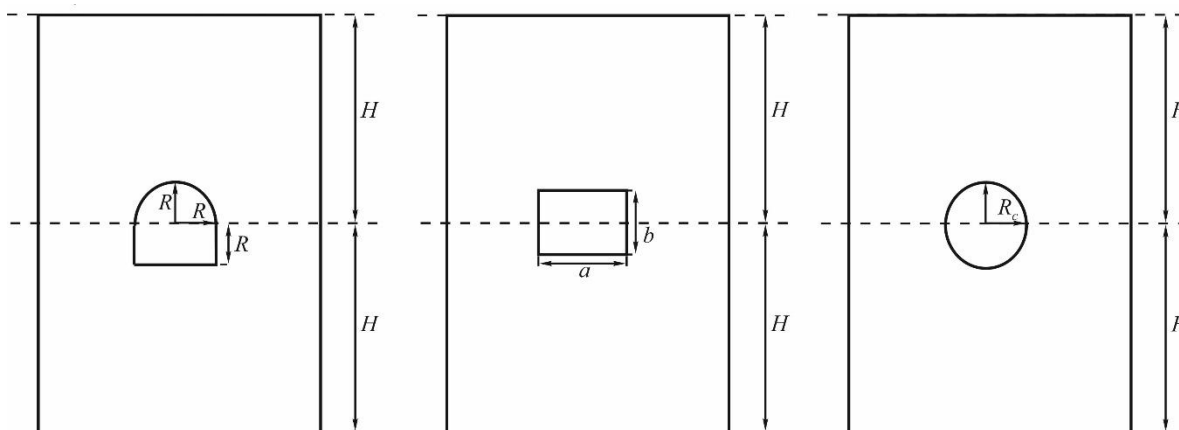


Рис. 1. Расчетная схема массива с выработками арочной, прямоугольной и круглой формы

Задача определения полей напряжений и деформаций в массиве горных пород в окрестности выработки выполнялась в два этапа:

- 1) определение напряженно-деформированного состояния массива без выработки,

2) учет преднапряженного состояния (напряженное состояние массива без выработки) при расчете НДС массива с выработкой для получения перемещений в массиве, вызванных непосредственно выработкой.

На рисунке 2 представлены картины распределения деформаций в окрестности контура выработки при глубине залегания последней $H=500$ м. Видно, что максимальные значения деформаций находятся в непосредственной близости от контура выработки.

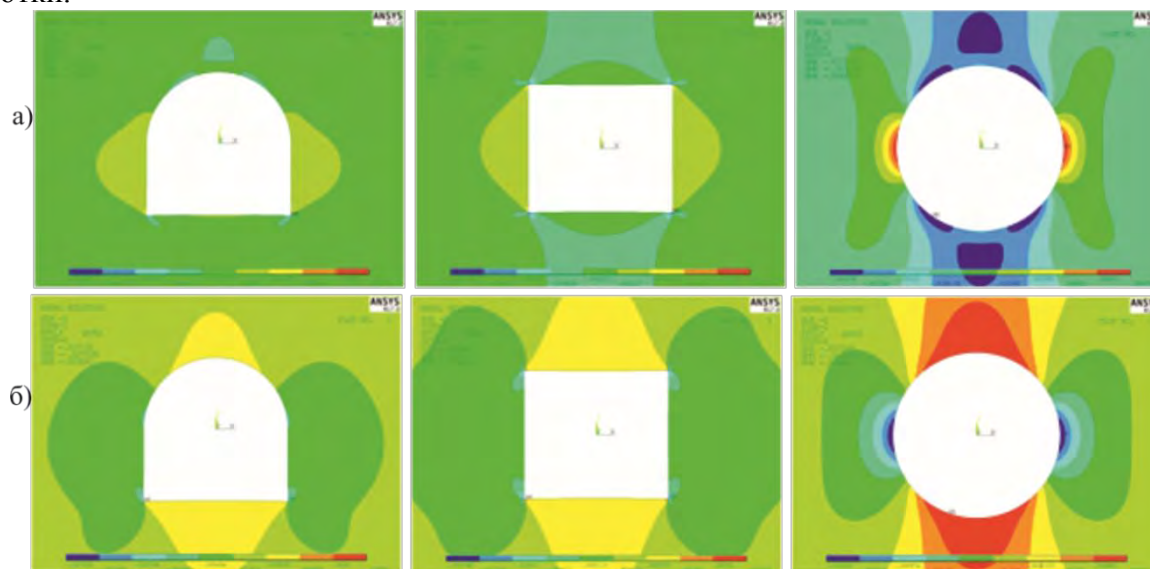


Рис. 2. Распределение деформаций ε_x (а) и ε_y (б)

Как было упомянуто ранее, для анализа степени поврежденности массивов горных пород в окрестности контура выработки представляется перспективным использовать модель деформированного твердого тела с опасным объемом, в соответствии с которой опасные объемы – это трехмерные области, где напряжения достигают, например, нижней границы рассеяния предельных напряжений (допускаемых напряжений) [3, 4].

Рассмотрим тензор механического параметра φ_{ij} , конкретизациями которого являются тензоры напряжений σ_{ij} и деформаций ε_{ij} . Для однородного изотропного деформируемого твердого тела определим предельные нормальные и касательные значения $\varphi_n^{(*\text{lim})}$ и $\varphi_\tau^{(*\text{lim})}$ тензора $\varphi_{ij}^{(\pm*\text{lim})}$, а также предельное главное значение тензора $\varphi_1^{(*\text{lim})}$ и предельную интенсивность $\varphi_{\text{int}}^{(*\text{lim})}$ [3, 4]:

$$\begin{aligned} \varphi_n^{(*\text{lim})} &= \max_{dV,i} \left(\left| \varphi_{ii}(F_{\text{lim}}, dV) \right| \right), \quad i = x, y, z, \\ \varphi_\tau^{(*\text{lim})} &= \max_{dV,i,j} \left(\left| \varphi_{ij}(F_{\text{lim}}, dV) \right| \right), \quad i, j = x, y, z, \quad i \neq j, \\ \varphi_1^{(*\text{lim})} &= \max_{dV} [\varphi_1(F_{\text{lim}}, dV)], \\ \varphi_{\text{int}}^{(*\text{lim})} &= \max_{dV} [\varphi_{\text{int}}(F_{\text{lim}}, dV)], \end{aligned} \quad (1)$$

где dV – элементарный объем нагруженного тела.

Следовательно, если рассмотреть тензор φ_{ij} в каждом элементарном объеме dV тела, то в общем случае для описания изменения величины действующих напряжений по сравнению с величиной предельных напряжений можно ввести три типа относительных повреждающих напряжений [3, 4]: компонентные, главные и октаэдрические:

$$\psi_{ij} = \left| \varphi_{ij} / \varphi_m^{(*\text{lim})} \right|,$$

$$\begin{aligned}\Psi_i &= |\varphi_i / \varphi_1^{(*\text{lim})}|, \\ \Psi_{\text{int}} &= \varphi_{\text{int}} / \varphi_{\text{int}}^{(*\text{lim})}.\end{aligned}\quad (2)$$

Соотношения (2) представляют собой показатели локальной повреждаемости элементарного объема тела.

Условия для ограничения опасных объемов с учетом формул (2) будут иметь вид

$$\begin{aligned}V_{ij} &= \{dV / \varphi_{ij} \geq \varphi_m^{(*\text{lim})}, dV \subset V_k\}, i, j = x, y, z, \\ m &= \begin{cases} n & \text{при } i = j, \\ \tau & \text{при } i \neq j, \end{cases} \\ V_i &= \{dV / \varphi_i \geq \varphi_1^{(*\text{lim})}, dV \subset V_k\}, i = 1, 2, 3, \\ V_{\text{int}} &= \{dV / \varphi_{\text{int}} \geq \varphi_1^{(*\text{lim})}, dV \subset V_k\},\end{aligned}\quad (3)$$

где V_k – рабочий объем нагруженного тела.

Расчет опасных объемов (3) в общем случае осуществляется следующим образом [3, 4]:

$$V_q = \int_{\Psi_q \geq 1} dV, \quad q = x, y, z, 1, 2, 3, \text{int}.\quad (4)$$

Опасные объемы (3) являются интегральными показателями абсолютной повреждаемости тела, содержащими сведения как о напряженно-деформируемом, так и предельном состояниях.

В качестве относительной интегральной повреждаемости может быть использовано отношение опасного объема к рабочему:

$$\omega_q = V_q / V_k.\quad (5)$$

Помимо понятия опасного объема в качестве интегрального показателя оценки состояния массивов горных пород в окрестности выработки может также использоваться такая величина, как повреждаемость опасного объема [3, 4], учитывающая распределение в нем локальной повреждаемости Ψ_q :

$$\Psi_q = \int_{\Psi_q \geq 1} \Psi_q dV.\quad (6)$$

Для выполнения расчетов опасных объемов была создана программа на базе встроенного в ANSYS языка APDL [5,6]. Алгоритм работы программы заключается в сохранении массива данных значений напряжений и деформаций по всем конечным элементам и использования их в дальнейших вычислениях значений локальной повреждаемости, как отношений действующих и предельных напряжений или деформаций:

$$\Psi_q^i = \varepsilon_q^i / \varepsilon_q^{\text{lim}}, \quad q = x, y, \text{int}, 1, 3.\quad (7)$$

Величины объемов элементов, для которых выполняется условие

$$\Psi^i \geq 1,\quad (8)$$

суммируются в соответствии с (4) и (6) для получения значения опасного объема V и его повреждаемости Ψ для всей расчетной модели в целом:

$$V_q = \sum_{i=1}^N H(\Psi^i - 1) \Delta V^i, \quad q = x, y, \text{int}, 1, 3.\quad (9)$$

$$\Psi_q = \sum_{i=1}^N \Psi^i H(\Psi^i - 1) \Delta V^i,\quad (10)$$

где N – количество конечных элементов, H – функция Хевисайда, ΔV^i – объем i -го конечного элемента.

В двумерной постановке, опасный объем V принимает вид опасной площади S .

На рисунках 3 и 4 представлены результаты выполненных расчетов. На рисунке 3 показаны опасные площади при оценке деформаций в соответствии с (7) при $H = 500$ м для выработок арочной, прямоугольной и круглой форм поперечного сечения.

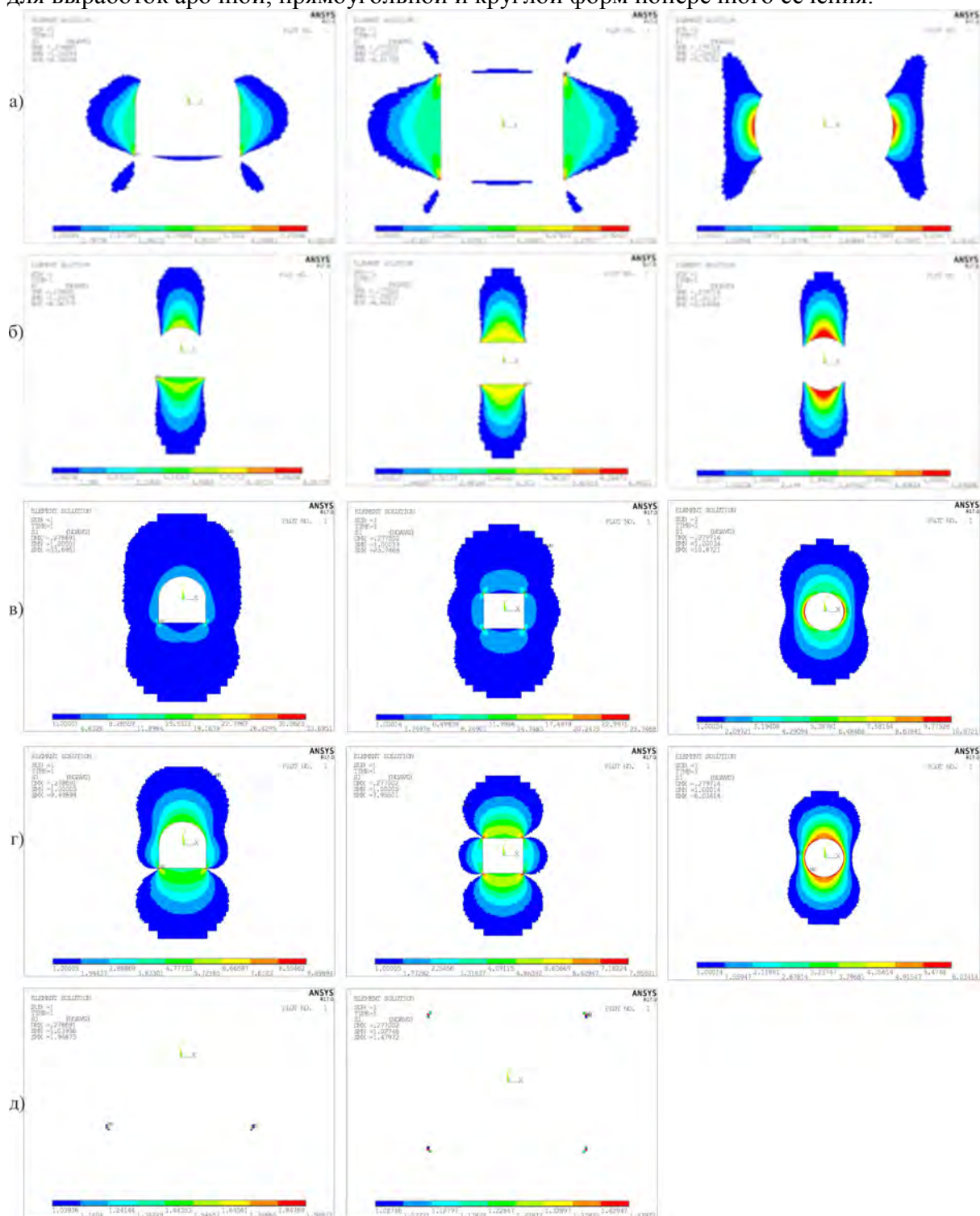


Рис. 3. Опасный объем для $\psi_x = \epsilon_x / \epsilon_x^{\text{lim}}$ (а), $\psi_y = \epsilon_y / \epsilon_y^{\text{lim}}$ (б), $\psi_{\text{int}} = \epsilon_{\text{int}} / \epsilon_{\text{int}}^{\text{lim}}$ (в), $\psi_1 = \epsilon_1 / \epsilon_1^{\text{lim}}$ (г), $\psi_3 = \epsilon_3 / \epsilon_3^{\text{lim}}$ (д)

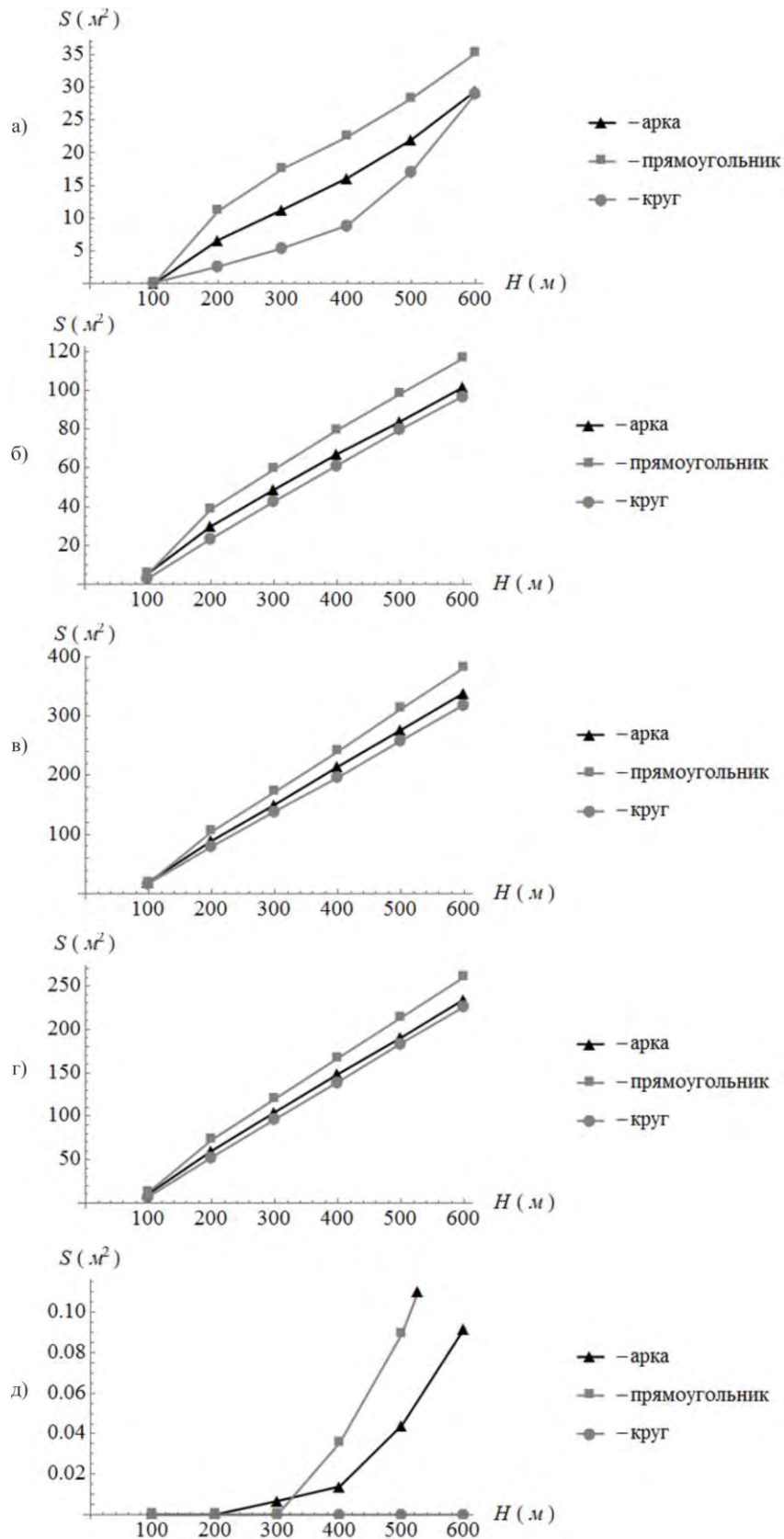


Рис. 4. Зависимость опасной площади от глубины выработки для $\Psi_x = \varepsilon_x / \varepsilon_x^{lim}$ (а), $\Psi_y = \varepsilon_y / \varepsilon_y^{lim}$

(б), $\Psi_{int} = \varepsilon_{int} / \varepsilon_{int}^{lim}$ (в), $\Psi_1 = \varepsilon_1 / \varepsilon_1^{lim}$ (г), $\Psi_3 = \varepsilon_3 / \varepsilon_3^{lim}$ (д)

Анализ результатов численных экспериментов показывает, что, выполняя оценку поврежденности по анализу деформаций ε_x , получаем, что основная часть опасного объема формируется в районе боковых граней выработки, а при оценке по деформаци-

ям ε_y - только в области кровли и в почве. При оценке повреждаемости по ε_{int} и ε_1 опасная площадь формируется вокруг всего контура выработки, а в случае ε_3 - в угловых областях контура выработки. Максимальные значения деформаций находятся в концентраторах – вершинах выработки (для прямоугольной и арочной формы).

Из рисунка 4 видно, что с ростом глубины залегания выработки опасная площадь S увеличивается (глубина выработки варьировалась от 100 до 600 м) [6, 7].

Величины опасной площади для круглой выработки принимают наименьшее значение, а при оценке по $\psi_3 = \varepsilon_3 / \varepsilon_3^{lim}$ опасная площадь не образуется вовсе. Наибольшие значения опасной площади принимает для выработки прямоугольной формы поперечного сечения при всех рассматриваемых глубинах ее залегания. Наименьшие значения опасной площади принимает для выработки круглой формы поперечного сечения.

Заключение. Разработана методология определения интегрального показателя состояния объемной повреждаемости массива в окрестности протяженной подземной выработки на основе модели деформированного твердого тела с опасным объемом.

Получены зависимости опасных объемов от глубины залегания выработок с арочной, прямоугольной и круглой формой поперечного сечения. Показано влияние формы поперечного сечения выработки и глубины ее залегания на напряженно-деформируемое состояние и объемную повреждаемость массива горных пород в окрестности выработки. При оценке деформаций наблюдается рост опасных объемов в окрестности выработки с увеличением глубины ее залегания для различных форм поперечного сечения выработки. Показано, что область расположения опасного объема зависит от критерия, по которому он рассчитывался, и от формы поперечного сечения выработки. Опасный объем (площадь) принимает наибольшие значения для выработки с прямоугольной формой поперечного сечения, а наименьшие - для выработки с круглой формой поперечного сечения во всем диапазоне значений рассмотренных глубин залегания выработок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Журавков, М.А. Опасные объемы в окрестности выработки в горном массиве / М.А. Журавков, С.С. Щербаков, Л.А. Шемет // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2016. – № 1 (32). – С. 83–90.
2. Оловянный, А.Г. Механика горных пород. Моделирование разрушений. – Спб.:ООО «Издательско-полиграфическая компания«КОСТА», 2012. – 280 с.
3. Журавков, М.А. Компьютерное моделирование в геомеханике / М.А. Журавков, О.Л. Коновалов, С.И. Богдан, П.А. Прохоров, А.В. Круподеров. – Минск: БГУ, 2008. - 443с.
4. Щербаков, С.С. Механика трибофатических систем / С.С. Щербаков, Л.А. Сосновский. - Минск, 2011. - 407 с.
5. Щербаков, С.С. Применение модели деформированного твердого тела с опасным объемом для исследования характеристик трещиноподобного повреждения / С.С. Щербаков, Л.А. Шемет /// Молодежь в науке - 2014: Приложение к журналу "Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі". -Ч.3. –Минск: Беларуская навука, –2015. – С. 101-104.
6. Щербаков, С. С. Применение концепции об опасных объемах для моделирования распространения трещиноподобного повреждения / С.С. Щербаков, Л.А. Шемет // Вестник БелГУТа : Наука и транспорт. – 2016. – № 1 (32). – С. 165–169.
7. Сосновский, Л.А. Принципы разработки и экспериментальное обоснование государственного стандарта по методам оценки трещиностойкости трубной стали с учетом ее пластических свойств / Л.А. Сосновский, Н.А. Козик, С.С. Щербаков, А.В. Богданович, В.В. Воробьев, Л.А. Шемет // Вестник БелГУТа : Наука и транспорт. – 2016. –№ 1 (32). – С. 157–164.

Поступила в редакцию 21.09.2016