

УДК 539.3

М. А. ЖУРАВКОВ, доктор физико-математических наук, С. С. ЩЕРБАКОВ, доктор физико-математических наук, Л. А. ШЕМЕТ, Белорусский государственный университет, Минск

ОПАСНЫЕ ОБЪЕМЫ В ОКРЕСТНОСТИ ВЫРАБОТКИ В ГОРНОМ МАССИВЕ

Представлен подход к определению объемной повреждаемости в окрестности подземной горной выработки на основе модели деформированного твердого тела с опасным объемом. Предложенная методика позволяет выполнить интегральную оценку объемной повреждаемости массива горных пород в окрестности выработок при варьировании горнотехнических и горно-геологических параметров. Получены зависимости опасных объемов от глубины залегания выработок с арочной и прямоугольной формами поперечного сечения.

Введение. Существует большое количество работ, посвященных изучению напряженно-деформированного состояния (НДС) в окрестности подземных выработок в массиве горных пород (см., например, [1–3]). Однако задача об интегральной оценке зон трещиноватости и объемов повреждаемости остается до конца нерешенной. Одним из эффективных способов решения данной задачи может быть оценка объемной повреждаемости в массивах горных пород на основе модели деформированного твердого тела с опасным объемом [4, 5] в зависимости от формы поперечного сечения выработки, глубины ее залегания и других параметров.

Постановка задачи. Объектом исследования являлся массив горных пород с выработками арочной и прямоугольной форм поперечного сечения.

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

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

Расчеты проводились на основе конечно-элементного пакета ANSYS. Задача определения полей напряжений и деформаций в массиве горных пород в окрестности выработки выполнялась в два этапа:

- 1) определение НДС массива без выработки;
- 2) учет преднапряженного состояния при расчете НДС массива с выработкой для получения перемещений в массиве, вызванных непосредственно выработкой.

На рисунках 3–8 представлены распределения деформаций и напряжений в окрестности выработки при глубине залегания последней $H = 500 \text{ м}$. Видно, что максимальные значения локализованы в непосредственной близости от контура выработки.

Опасный объем. Для анализа степени поврежденности массивов горных пород в окрестности выработки, на наш взгляд, весьма перспективно использовать модель деформированного твердого тела с опасным объемом, в соответствии с которой опасные объемы представляют собой трехмерные области, где напряжения достигают повреждающего уровня. В качестве такого уровня может выступать, например, нижняя граница рассеивания предельных напряжений [4, 5].

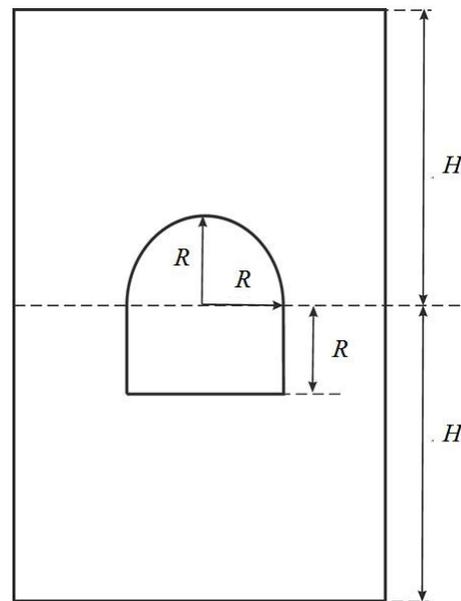


Рисунок 1 – Расчетная схема массива с выработкой арочной формы

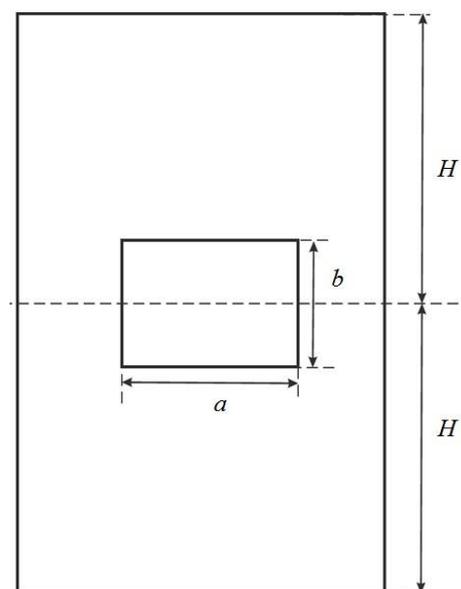


Рисунок 2 – Расчетная схема массива с выработкой прямоугольной формы

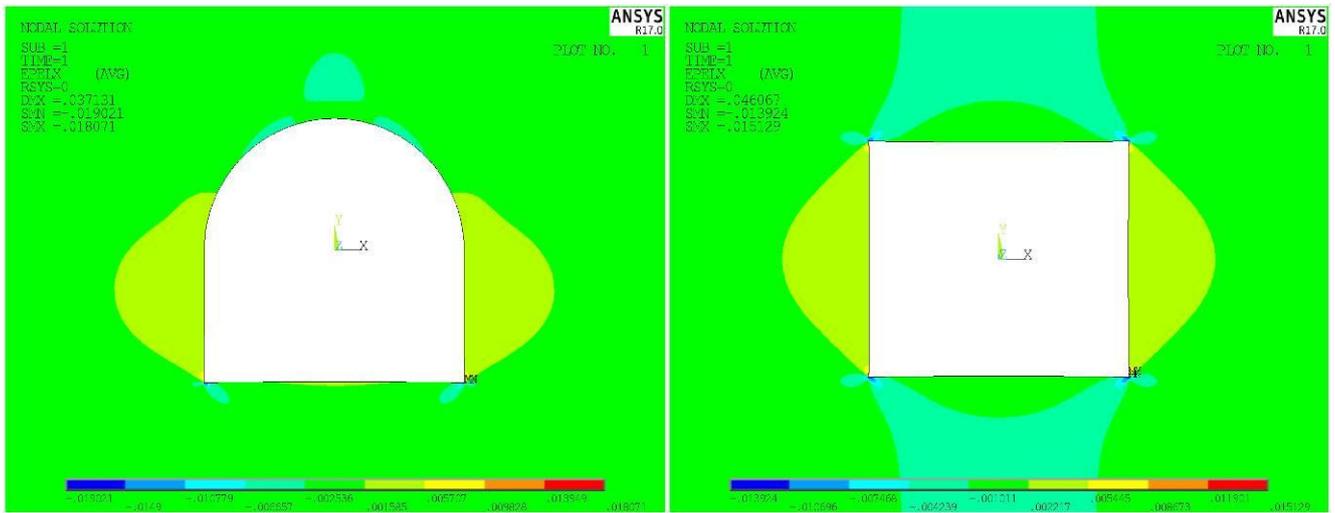


Рисунок 3 – Распределение деформаций ϵ_x

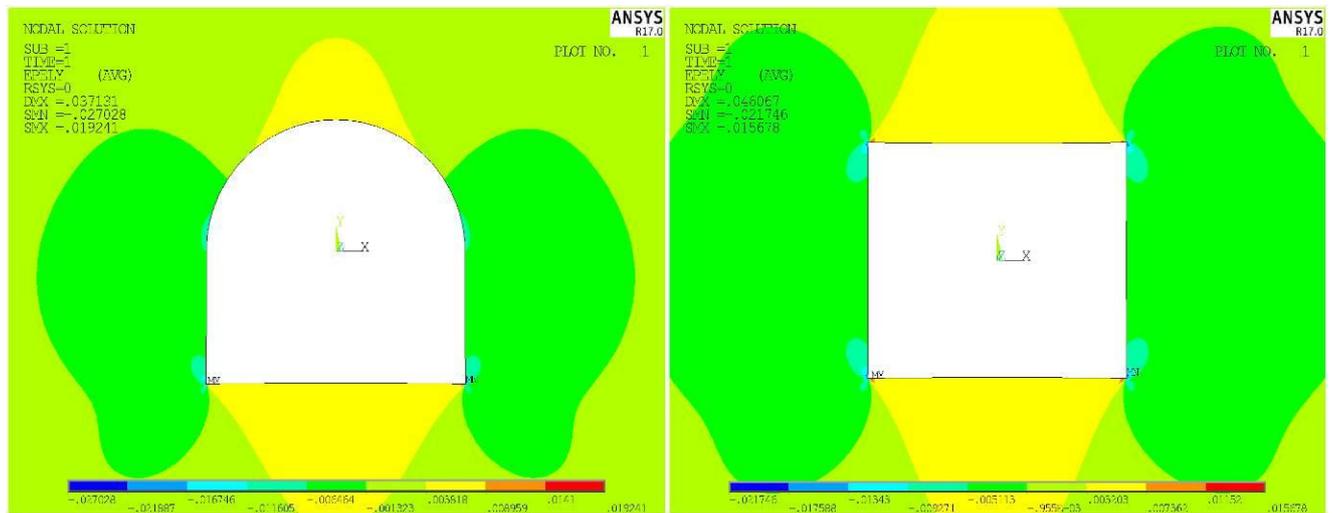


Рисунок 4 – Распределение деформаций ϵ_y

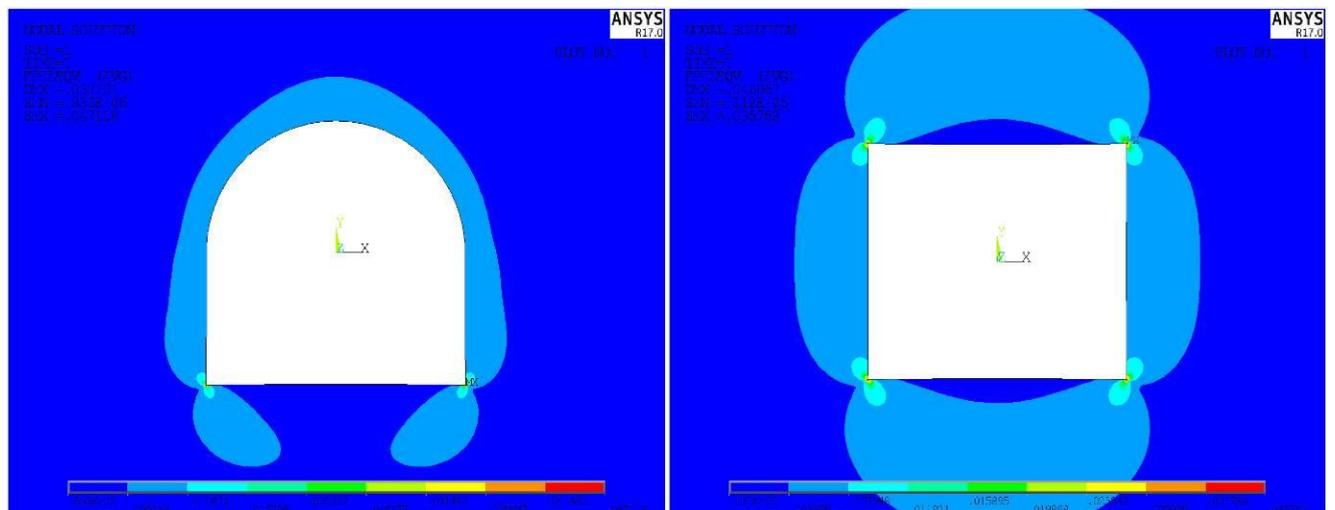


Рисунок 5 – Распределение деформаций ϵ_{int}

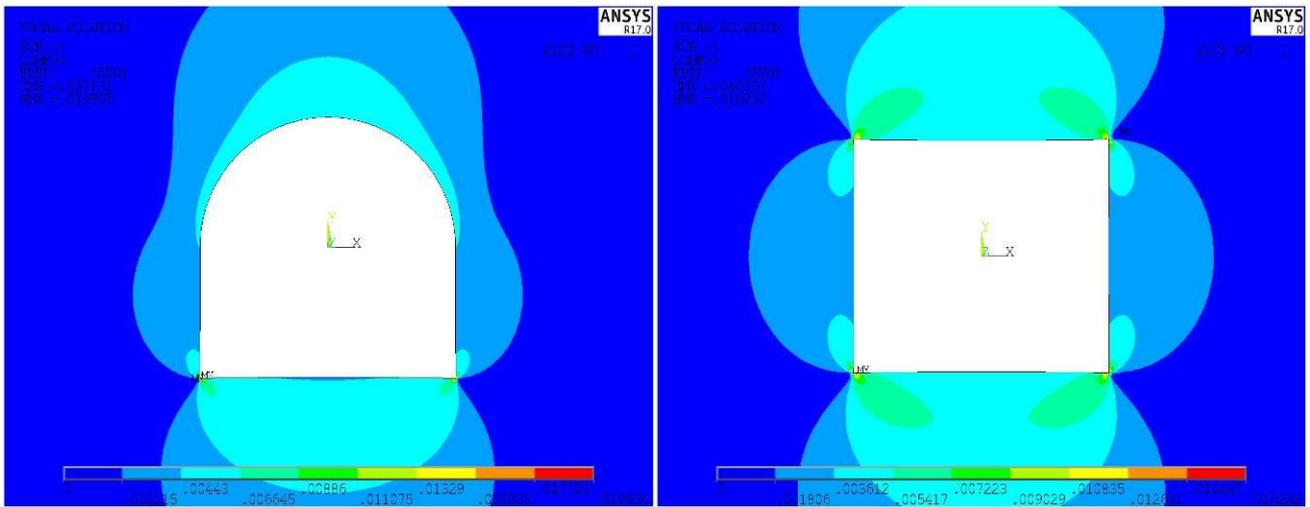


Рисунок 6 – Распределение деформаций ϵ_1

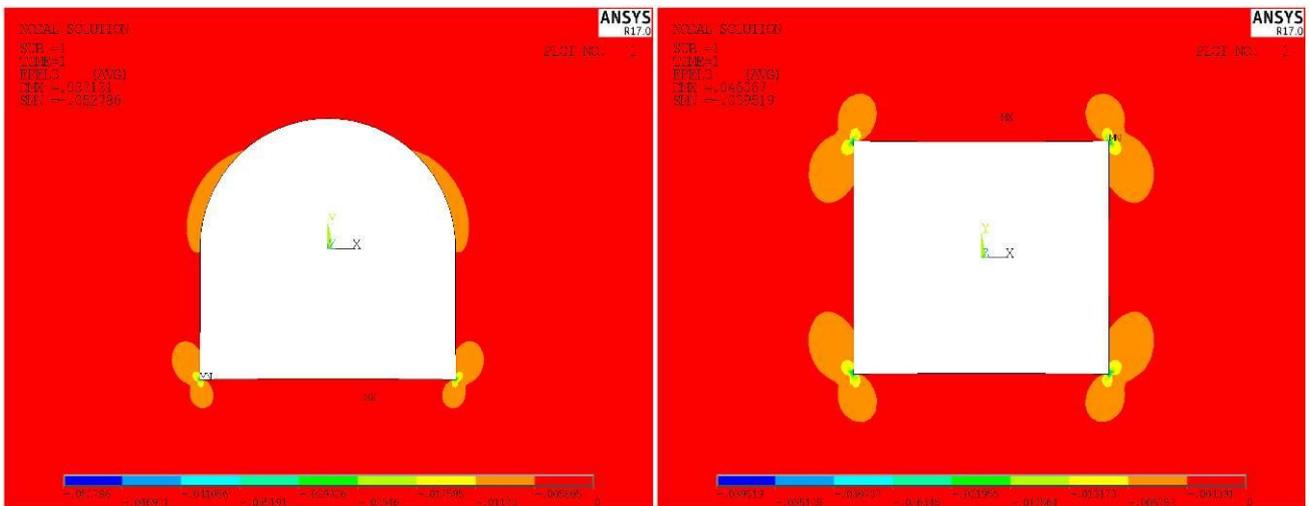


Рисунок 7 – Распределение деформаций ϵ_3

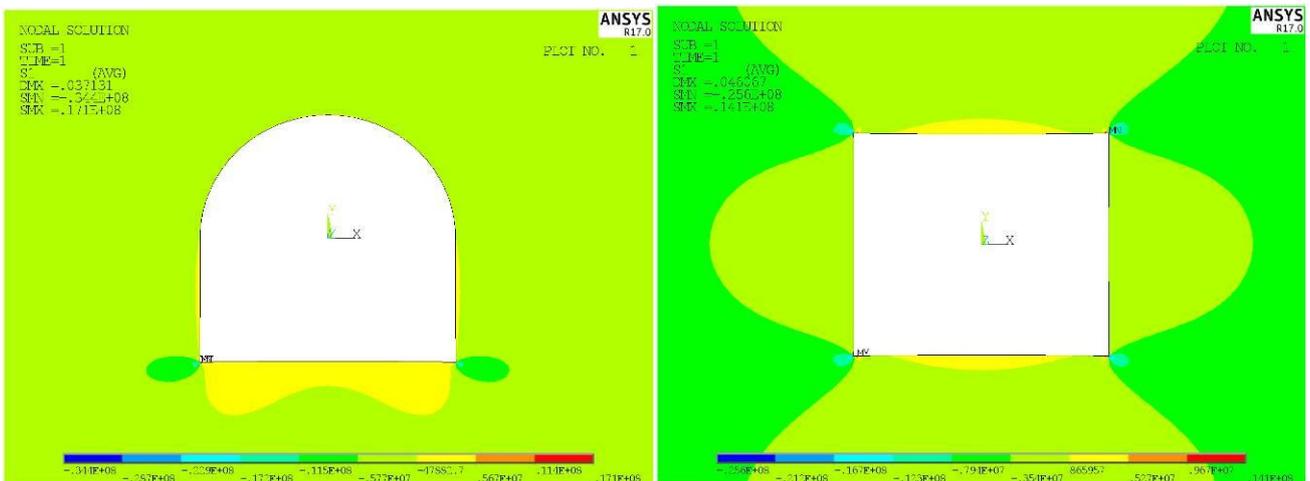


Рисунок 8 – Распределение напряжений σ_1

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 $\varphi_{\text{int}}^{(*\text{lim})}$ [4, 5]:

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

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 [4, 5]: компонентные, главные и октаэдрические:

$$\begin{aligned}\psi_{ij} &= \left| \varphi_{ij} / \varphi_m^{(*\text{lim})} \right|; \\ \psi_i &= \left| \varphi_i / \varphi_1^{(*\text{lim})} \right|; \\ \psi_{\text{int}} &= \varphi_{\text{int}} / \varphi_{\text{int}}^{(*\text{lim})}.\end{aligned}\quad (2)$$

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

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

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

где V_k – рабочий объем нагруженного тела.

Расчет опасных объемов (3) в общем случае осуществляется следующим образом [4, 5]:

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

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

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

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

Кроме опасного объема в качестве интегрального показателя состояния выработки может также использоваться повреждаемость опасного объема [4, 5]:

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

Опасный объем (площадь) в массиве горных пород с выработкой. Для выполнения расчетов опасных объемов была создана программа на базе встроенного в ANSYS языка APDL. 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 [5, 6]:

$$\begin{aligned}\psi_q^i &= \varepsilon_q^i / \varepsilon_q^{\text{lim}}, \quad q = x, y, 1, 3, \text{int}; \\ \psi_q^i &= \sigma_q^i / \sigma_q^{\text{lim}}, \quad q = I, V,\end{aligned}\quad (7)$$

где

$$\sigma_I = \sigma_1, \quad \sigma_V = \sigma_1 - \frac{\sigma_{\text{расп}}^{\text{lim}}}{\sigma_{\text{сж}}^{\text{lim}}} \sigma_3.\quad (8)$$

Величины объемов элементов, для которых выполняется условие

$$\psi^i \geq 1,\quad (9)$$

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

$$V_q = \sum_{i=1}^N H(\psi^i - 1) \Delta V^i, \quad q = x, y, 1, 3, I, V,\quad (10)$$

$$\Psi_q = \sum_{i=1}^N \psi^i H(\psi^i - 1) \Delta V^i,\quad (11)$$

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 9–15 показана опасная площадь, рассчитанная по различным критериям в соответствии с (7)–(8) при $H = 500$ м для выработок арочной и прямоугольной формы. Анализ результатов показывает, что при оценке деформаций $\varepsilon_x, \varepsilon_{\text{int}}, \varepsilon_1$ опасная площадь формируется вокруг всего контура выработки. Для величин $\varepsilon_y, \sigma_I, \sigma_V$ опасная площадь формируется над кровлей и в районе почвы выработки либо, как в случае ε_3 , – в углах выработки. При оценке повреждаемости по σ_I, σ_V опасная площадь для прямоугольной выработки находится в районе кровли и почвы, а для арочной – только в районе почвы.

На рисунках 16–28 представлены зависимости опасной площади от глубины залегания выработки. Видно, что с ростом глубины опасная площадь S увеличивается (глубина выработки варьировалась от 100 до 600 м). Величины опасной площади S для прямоугольной формы выработки больше, чем для выработки арочной формы, за исключением расчетов для $\psi_I = \sigma_I / \sigma_I^{\text{lim}}$ и $\psi_V = \sigma_V / \sigma_V^{\text{lim}}$.

Разница между величинами опасной площади для выработки арочной и прямоугольной форм увеличивается с ростом глубины залегания, наибольшая разница наблюдается для ψ_y, ψ_I .

На рисунках 29–35 представлена зависимость повреждаемости опасного объема Ψ в соответствии с (11) от глубины залегания выработки. Видно, что с ростом глубины повреждаемость увеличивается. При оценке опасных площадей по деформациям $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_{\text{int}}, \varepsilon_1$ кривые имеют схожую форму, и повреждаемость Ψ принимает наибольшие значения на всех рассматриваемых глубинах для выработки прямоугольной формы, а для $\varepsilon_3, \sigma_I, \sigma_V$ – начиная с $H = 400$ м. Наибольшее значение повреждаемости Ψ на глубине 600 м в расчете для $\psi_{\text{int}} = \varepsilon_{\text{int}} / \varepsilon_{\text{int}}^{\text{lim}}$, наименьшее – для $\psi_3 = \varepsilon_3 / \varepsilon_3^{\text{lim}}$.

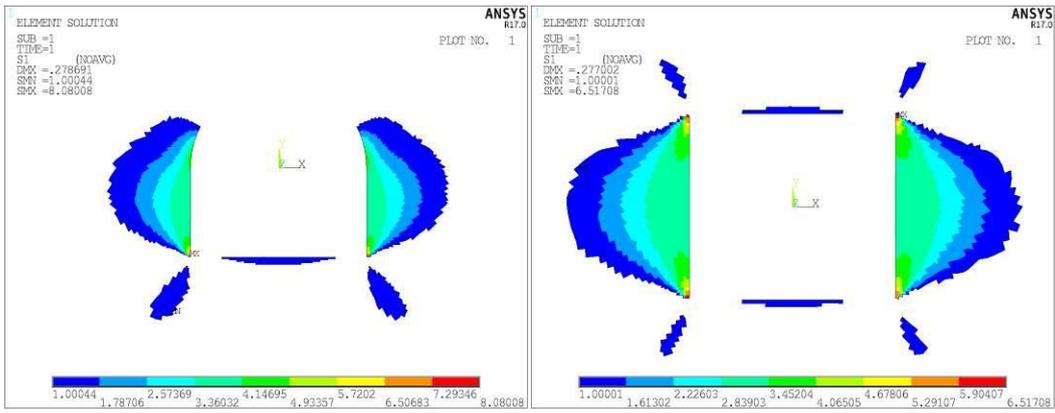


Рисунок 9 – Опасный объем для $\Psi_x = \epsilon_x / \epsilon_x^{\text{lim}}$

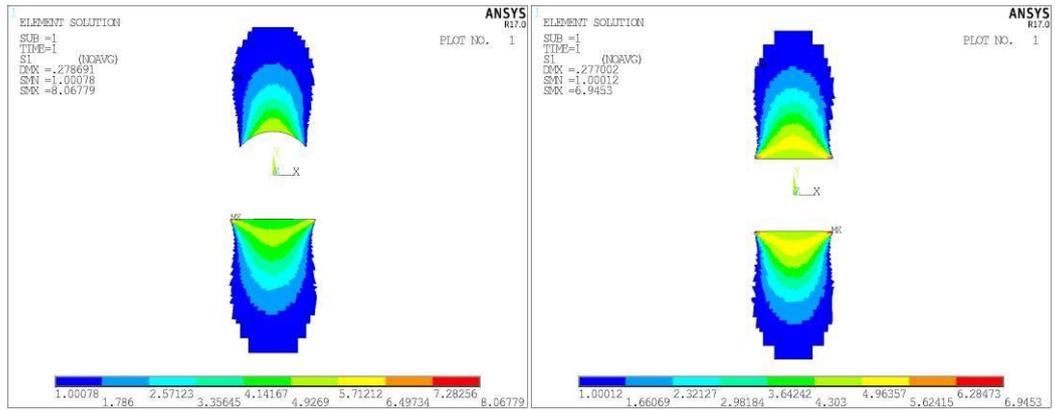


Рисунок 10 – Опасный объем для $\Psi_y = \epsilon_y / \epsilon_y^{\text{lim}}$

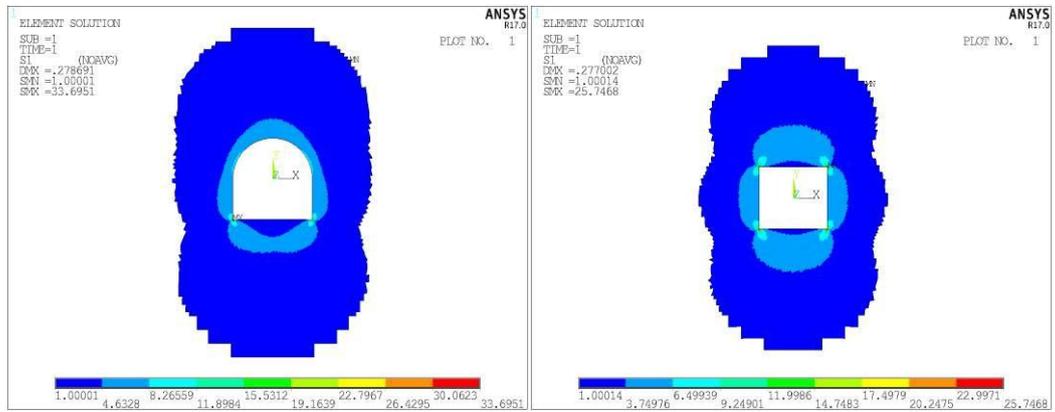


Рисунок 11 – Опасный объем для $\Psi_{\text{int}} = \epsilon_{\text{int}} / \epsilon_{\text{int}}^{\text{lim}}$

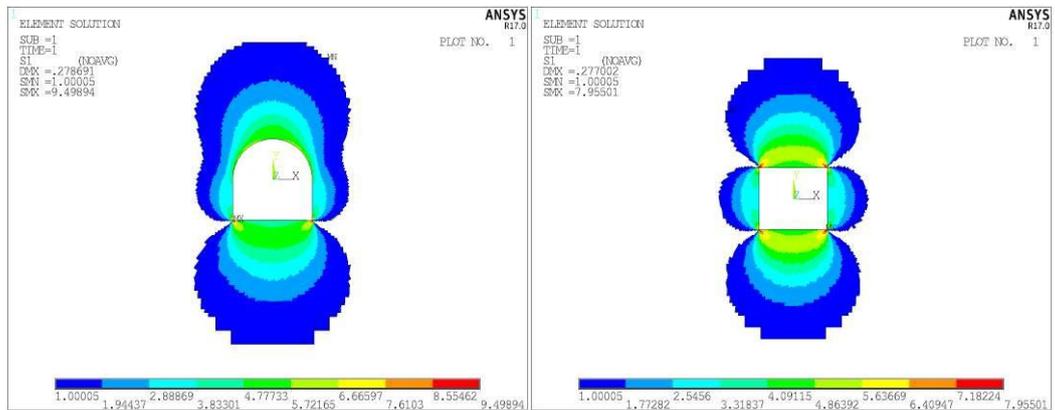


Рисунок 12 – Опасный объем для $\Psi_1 = \epsilon_1 / \epsilon_1^{\text{lim}}$

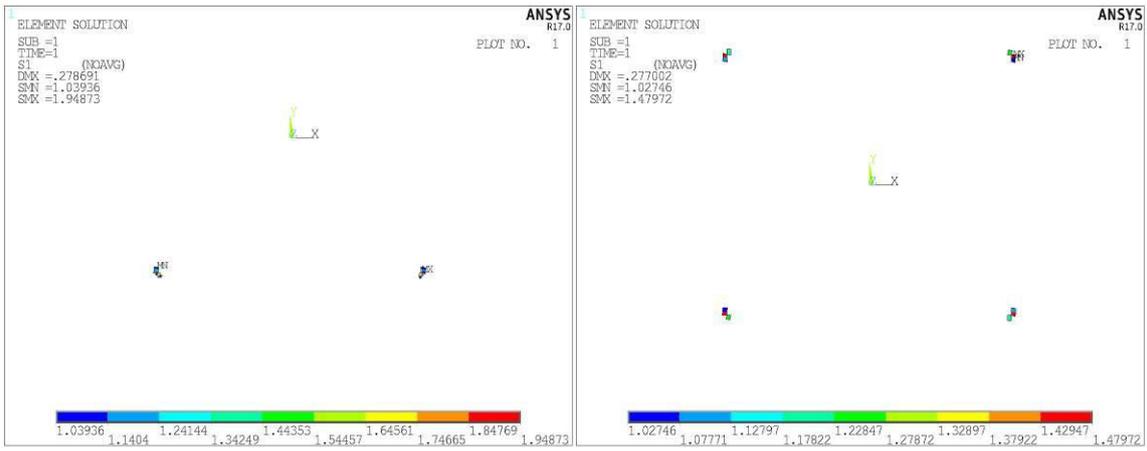


Рисунок 13 – Опасный объем для $\Psi_3 = \epsilon_3 / \epsilon_3^{\text{lim}}$

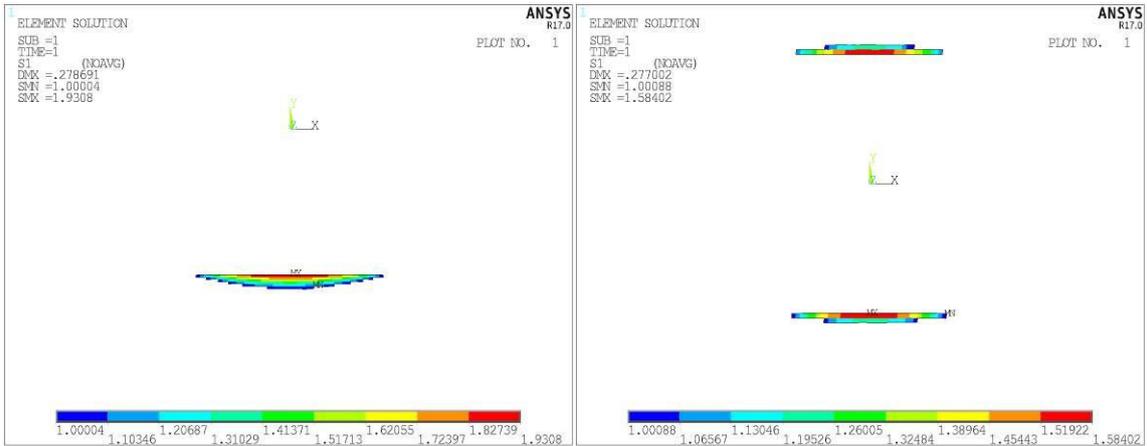


Рисунок 14 – Опасный объем для $\Psi_I = \sigma_I / \sigma_I^{\text{lim}}$

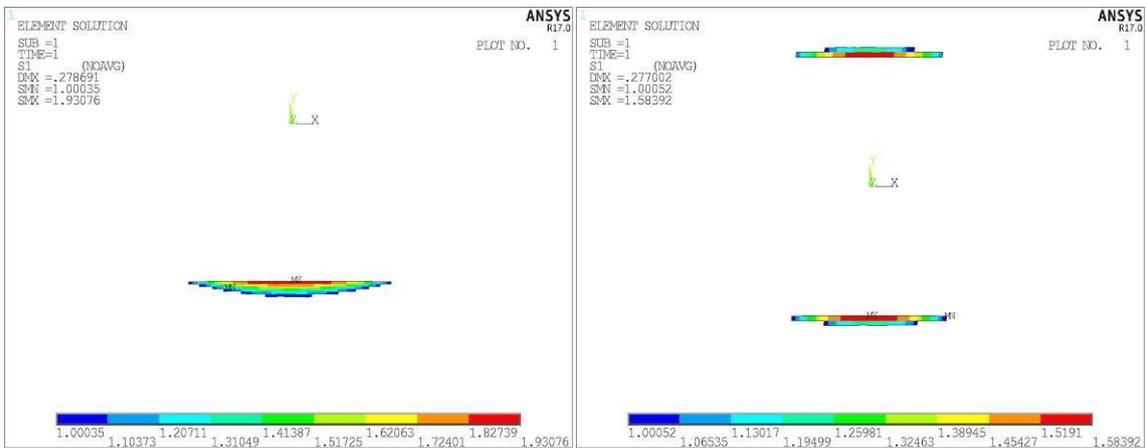


Рисунок 15 – Опасный объем для $\Psi_V = \sigma_V / \sigma_V^{\text{lim}}$

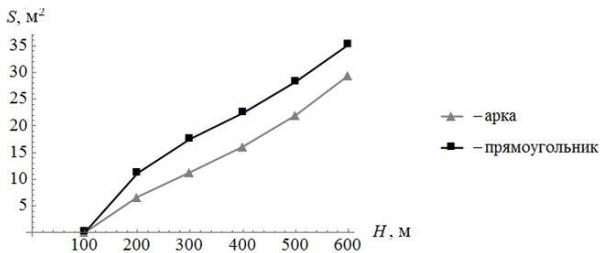


Рисунок 16 – Зависимость опасной площади от глубины выработки для $\Psi_x = \epsilon_x / \epsilon_x^{\text{lim}}$

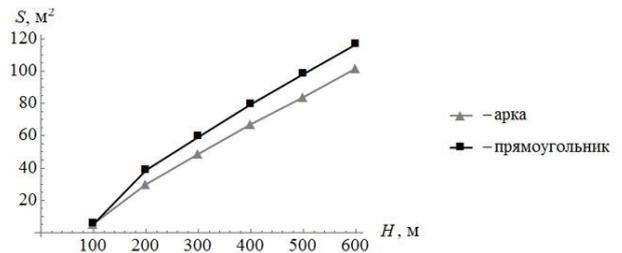


Рисунок 17 – Зависимость опасной площади от глубины выработки для $\Psi_y = \epsilon_y / \epsilon_y^{\text{lim}}$

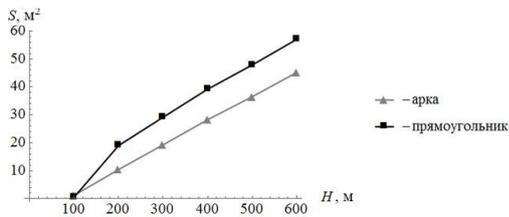


Рисунок 18 – Зависимость опасной площади от глубины выработки для $\psi_y = \epsilon_y / \epsilon_y^{\text{lim}}$ в кровле

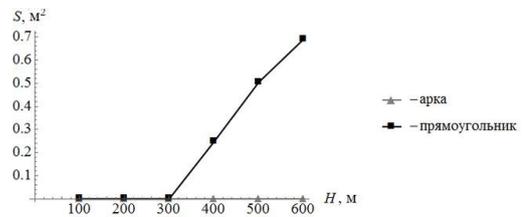


Рисунок 24 – Зависимость опасной площади от глубины выработки для $\psi_l = \sigma_l / \sigma_l^{\text{lim}}$ в кровле

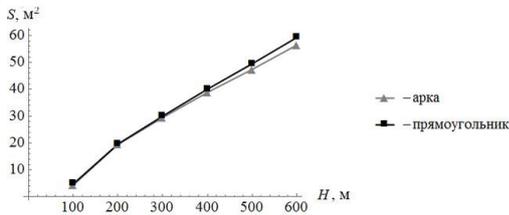


Рисунок 19 – Зависимость опасной площади от глубины выработки для $\psi_y = \epsilon_y / \epsilon_y^{\text{lim}}$ в почве

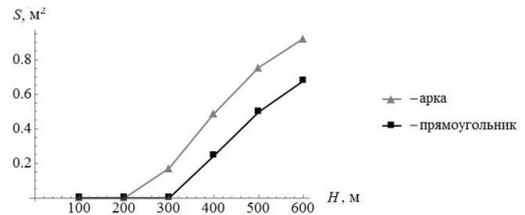


Рисунок 25 – Зависимость опасной площади от глубины выработки для $\psi_l = \sigma_l / \sigma_l^{\text{lim}}$ в почве

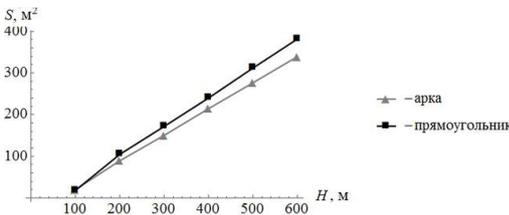


Рисунок 20 – Зависимость опасной площади от глубины выработки для $\psi_{\text{int}} = \epsilon_{\text{int}} / \epsilon_{\text{int}}^{\text{lim}}$

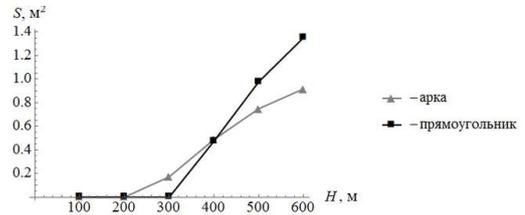


Рисунок 26 – Зависимость опасной площади от глубины выработки для $\psi_v = \sigma_v / \sigma_v^{\text{lim}}$

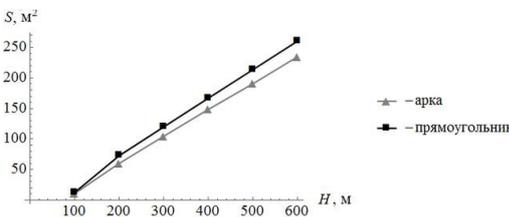


Рисунок 21 – Зависимость опасной площади от глубины выработки для $\psi_1 = \epsilon_1 / \epsilon_1^{\text{lim}}$

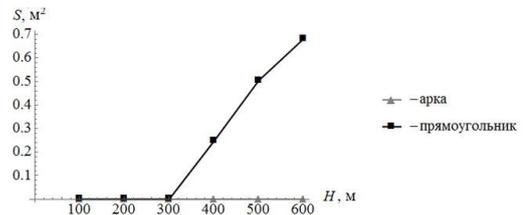


Рисунок 27 – Зависимость опасной площади от глубины выработки для $\psi_v = \sigma_v / \sigma_v^{\text{lim}}$ в кровле

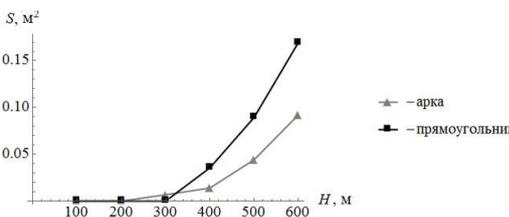


Рисунок 22 – Зависимость опасной площади от глубины выработки для $\psi_3 = \epsilon_3 / \epsilon_3^{\text{lim}}$

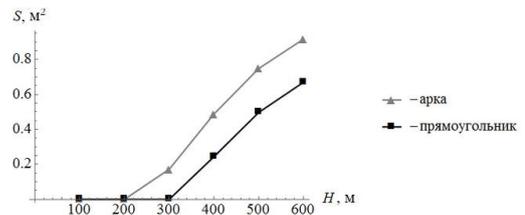


Рисунок 28 – Зависимость опасной площади от глубины выработки для $\psi_v = \sigma_v / \sigma_v^{\text{lim}}$ в почве

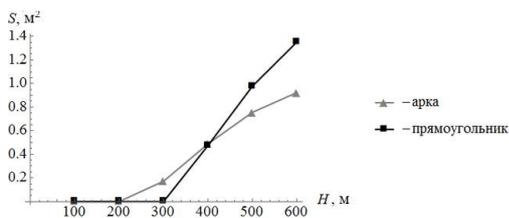


Рисунок 23 – Зависимость опасной площади от глубины выработки для $\psi_l = \sigma_l / \sigma_l^{\text{lim}}$

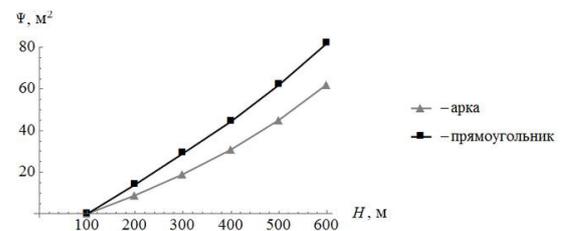


Рисунок 29 – Зависимость повреждаемости опасной площади от глубины выработки для $\psi_x = \epsilon_x / \epsilon_x^{\text{lim}}$

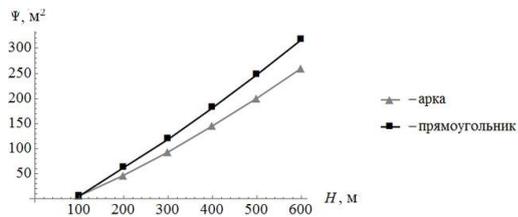


Рисунок 30 – Зависимость повреждаемости опасной площади от глубины выработки для $\Psi_y = \epsilon_y / \epsilon_y^{\text{lim}}$

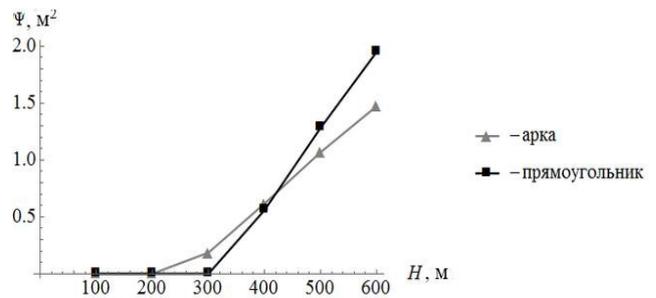


Рисунок 35 – Зависимость повреждаемости опасной площади от глубины выработки для $\Psi_v = \sigma_v / \sigma_v^{\text{lim}}$

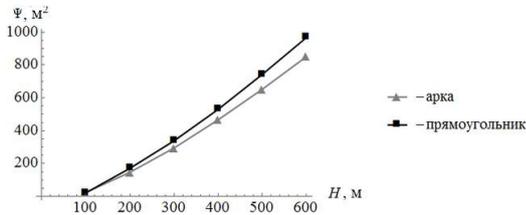


Рисунок 31 – Зависимость повреждаемости опасной площади от глубины выработки для $\Psi_{\text{int}} = \epsilon_{\text{int}} / \epsilon_{\text{int}}^{\text{lim}}$

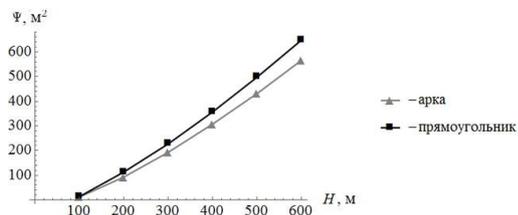


Рисунок 32 – Зависимость повреждаемости опасной площади от глубины выработки для $\Psi_1 = \epsilon_1 / \epsilon_1^{\text{lim}}$

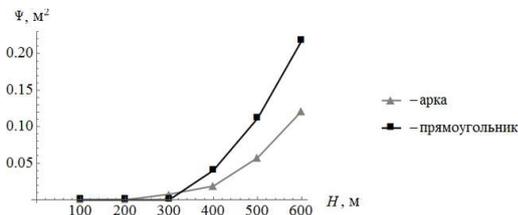


Рисунок 33 – Зависимость повреждаемости опасной площади от глубины выработки для $\Psi_3 = \epsilon_3 / \epsilon_3^{\text{lim}}$

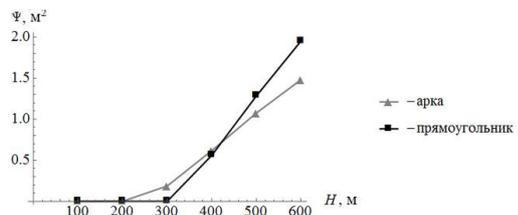


Рисунок 34 – Зависимость повреждаемости опасной площади от глубины выработки для $\Psi_l = \sigma_l / \sigma_l^{\text{lim}}$

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

Показано влияние формы поперечного сечения выработки и глубины ее залегания на НДС и объемную повреждаемость массива горных пород в окрестности выработки.

Показан рост опасных объемов в окрестности выработки с увеличением глубины ее залегания для различных форм поперечного сечения выработки (арочная и прямоугольная). Также показано, что для большинства эквивалентных напряжений и глубин залегания объемная повреждаемость выше в окрестности выработки прямоугольной формы поперечного сечения по сравнению с арочной формой.

Список литературы

- 1 Журавков, М. А. Теоретические основы деформационной механики блочно-слоистого массива соляных горных пород / М. А. Журавков, М. Д. Мартыненко. – Минск : Университетское, 1995. – 255 с.
- 2 Журавков, М. А. Фундаментальные решения теории упругости и некоторые их применения в геомеханике, механике грунтов и оснований : курс лекций / М. А. Журавков. – Минск : БГУ, 2008. – 247 с.
- 3 Компьютерное моделирование в геомеханике / М. А. Журавков [и др.]. – Минск : БГУ, 2008. – 443 с.
- 4 Сосновский, Л. А. Фундаментальные и прикладные задачи трибофаттики : курс лекций / Л. А. Сосновский, С. С. Щербаков. – Минск : БГУ, 2011. – 488 с.
- 5 Щербаков, С. С. Механика трибофатических систем / С. С. Щербаков, Л. А. Сосновский. – Минск : БГУ, 2011. – 407 с.
- 6 Шемет, Л. А. Моделирование трещиноподобного повреждения для различных эквивалентных напряжений / С. С. Щербаков, Л. А. Шемет // Теоретическая и прикладная механика : межвед. сб. науч.-метод. статей. – Вып. 30. – Минск : БНТУ. – 2015. – С. 263–269.

Получено 19.03.2016

M. A. Zhuravkov, S. S. Sherbakov, L. A. Shemet. Dangerous volumes in the neighborhood of the mining work in rock massif.

Method for determining volumetric damageability in the neighborhood of mining work based on the model of the deformable solid body with dangerous volume is presented. This method allows making an integral assessment and comparison by damage of mining works under variation of their main parameters: shape, depth, area of cross section, presence of stress relieving mining works etc. Dependences of dangerous volumes on the depth of the works with arch and rectangular cross-sectional shapes were obtained.