



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-7-47-54>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 519.6

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕМНОЙ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ В ОКРЕСТНОСТИ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ

ЩЕРБАКОВ С.С.^{1,2}, ШЕМЕТ Л.А.², НАСАНЬ О.А.²

¹ Государственный комитет по науке и технологиям (г. Минск, Республика Беларусь)

² Белорусский государственный университет (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 9 сентября 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Объект исследования – массив горных пород с различными формами поперечного сечения выработки. Целью работы является компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния и объемной повреждаемости в окрестности горной выработки. Ненарушенный горный массив еще до образования выработки обладает начальным напряженно-деформированным состоянием (под собственным весом). Поэтому для определения напряженно-деформированного состояния массива с выработкой следует сначала рассчитать напряженное состояние массива без выработки, а затем учесть его как преднапряженное состояние для массива с выработкой. Оценка степени повреждаемости массива с выработкой проводилась на основе полученных распределений напряжений и деформаций. Расчет объемной повреждаемости производился с помощью модели деформированного твердого тела с опасным объемом. Опасный объем есть ограниченная область, где напряжения или деформации превышают установленный порог. Расчет опасных объемов и объемной повреждаемости проводился в конечно-элементном пакете ANSYS. Для этого была написана программа на языке APDL. Для каждого конечного элемента было рассчитано отношение действующих и предельных деформаций. Элементы, для которых данное отношение превышает единицу, и будут образовывать опасный объем для всей рассматриваемой модели. В итоге имеем список элементов, входящих в состав опасного объема, а также его величину. Разработанный метод оценки повреждаемости в окрестности подземной выработки учитывает различные формы сечения выработки и глубины ее залегания. Обоснована актуальность проведения исследования зон возможных разрушений с применением модели деформированного твердого тела с опасным объемом.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, метод конечных элементов, напряженно-деформируемое состояние, модель деформированного твердого тела с опасным объемом, объемная повреждаемость, горная выработка.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Щербаков С.С., Шемет Л.А., Насань О.А. Компьютерное моделирование объемной повреждаемости в окрестности горной выработки. Доклады БГУИР. 2020; 18(7): 47-54.

COMPUTER MODELING OF VOLUMETRIC DAMAGEABILITY IN THE MINE ROADWAY NEIGHBOURHOOD

SERGEI S. SHERBAKOV^{1,2}, LIUDMILA A. SHEMET², ALEH A. NASAN²

¹ State Committee on Science and Technology (Minsk, Republic of Belarus)

² Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 9 September 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The object of research is a rock massif with various cross-sectional shapes of roadway. The purpose of work: computer modeling of stress-strain state and volumetric damageability in the neighbourhood of a mine roadway. The undisturbed rock massif has an initial stress-strain state (under its own weight) before a mine roadway is formed. Therefore, to determine the stress-strain state of the rock massif with the mine roadway, we must first calculate the stress state of the rock massif without the roadway and then take it into account as a pre-stressed state for the rock massif therewith. Damageability assessment of the rock massif with a mine roadway was carried out based on the obtained distributions of stresses and strains. We calculated volumetric damageability through the model of a deformed solid body with dangerous volume. Dangerous volume is a limited area where stresses or strains exceed the predetermined threshold. Calculation of dangerous volumes and integral damageability was carried out in the finite element package ANSYS. The program was written in APDL. The ratios between the existing and limiting stresses was calculated for each finite element. The elements for which this ratio exceeds unity will form a dangerous volume for the whole model. As a result, we have an array of finite elements constituting the dangerous volume and its value. The developed method for assessing damageability in the mine roadway neighbourhood takes into account various cross-sectional shapes of the mine roadway and its depth. The relevance of studying possible destruction regions using the model of a deformed solid body with dangerous volume was substantiated.

Keywords: computer modeling, finite element method, stress-strain state, model of a deformed solid body with dangerous volume, volumetric damageability, mine roadway.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Sherbakov S.S., Shemet L.A., Nasan A.A. Computer modeling of volumetric damageability in the mine roadway neighbourhood. Doklady BGUIR. 2020; 18(7): 47-54.

Введение

Большое количество научных исследований посвящено определению и анализу с помощью компьютерного конечно-элементного моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) различных систем и объектов. В данной работе в качестве объекта рассматривается массив горных пород. Процессы разрушения горных массивов при ведении подземных работ имеют сложный характер. Возникает большая вероятность образования особых участков в кровле, почве и боках выработок. На этих участках могут одновременно по разным направлениям действовать сжимающие и растягивающие напряжения. Таким образом, можно выделить предполагаемые зоны разрушения в элементах выработки. [1–5].

Существует множество критериев для определения данных зон, однако задача об их интегральной оценке остается до конца нерешенной. Авторами предлагается один из вариантов решения данной проблемы с использованием модели деформированного твердого тела с опасным объемом [1, 2].

Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния объекта исследования

В качестве объекта исследования рассматривался массив горных пород с выработкой. Были разработаны три модели с разной геометрией поперечного сечения выработки (арочная, прямоугольная и круглая), но с одинаковой площадью $S_{pr} = 32,13 \text{ м}^2$, как показано на рис. 1. Геометрические характеристики и свойства материала были приняты следующими: $H = 100\text{--}600 \text{ м}$, $R = 3 \text{ м}$, $R_c = 3,2 \text{ м}$, $a = 6 \text{ м}$, $b = 5,355 \text{ м}$, $g = 9,8 \text{ м/с}^2$, $\rho = 2300 \text{ кг/м}^3$, $E = 1,75 \cdot 10^9 \text{ Па}$, $\nu = 0,28$, $\sigma_{сж}^{\text{lim}} = -25,2 \text{ МПа}$, $\sigma_p^{\text{lim}} = 1,8 \text{ МПа}$.

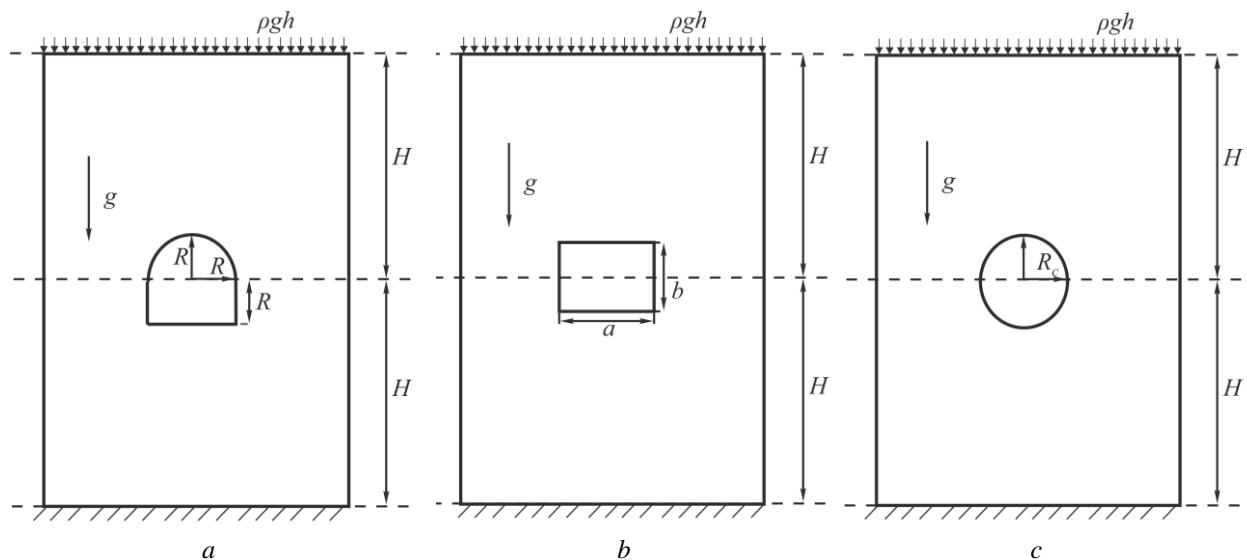


Рис. 1. Расчетные модели объекта исследования с учетом формы поперечного сечения выработки:
a – арка; *b* – прямоугольник; *c* – круг

Fig. 1. Design models of the research object, taking into account the shape of the cross-section of the mining work: *a* – arch; *b* – rectangle; *c* – circle

Ненарушенный горный массив еще до образования выработки обладает начальным НДС (под собственным весом). Поэтому для определения НДС массива с выработкой следует сначала рассчитать НДС массива без выработки (рис. 2), а затем учесть его как преднапряженное состояние для массива с выработкой [1, 2].

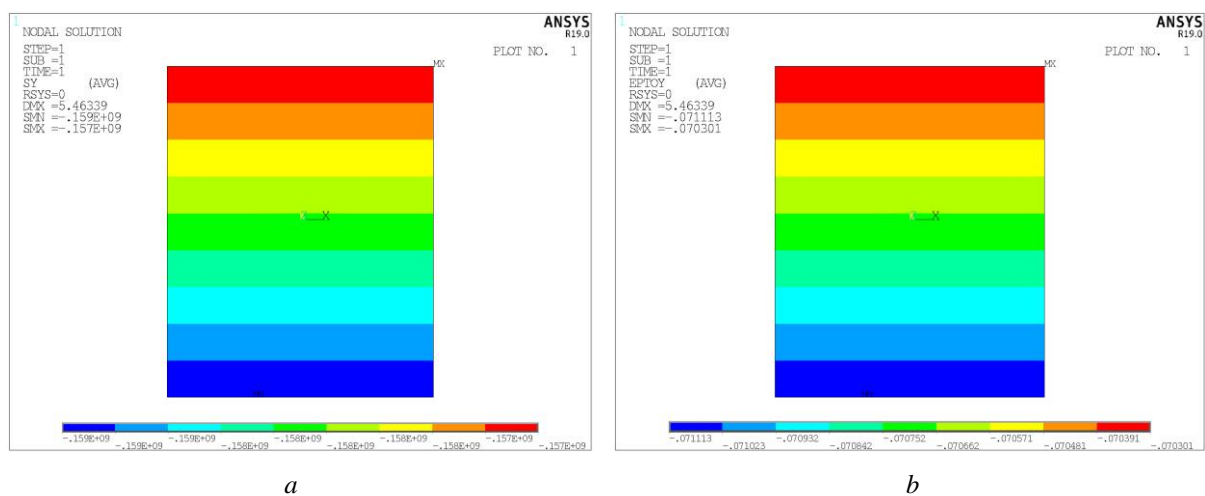


Рис. 2. Распределение напряжений и деформаций в массиве без выработки: *a* – σ_y ; *b* – ϵ_y
Fig. 2. Distribution of stresses and strains in a rock massif without mine roadway: *a* – σ_y ; *b* – ϵ_y

Расчеты полей напряжений и деформаций проводились для различных глубин залегания выработки. В частности, на рис. 3 представлены результаты для глубины $H = 500 \text{ м}$.

Из рисунка видно, что значения деформаций вблизи контура выработки намного больше, чем в самом массиве на достаточном удалении от выработки.

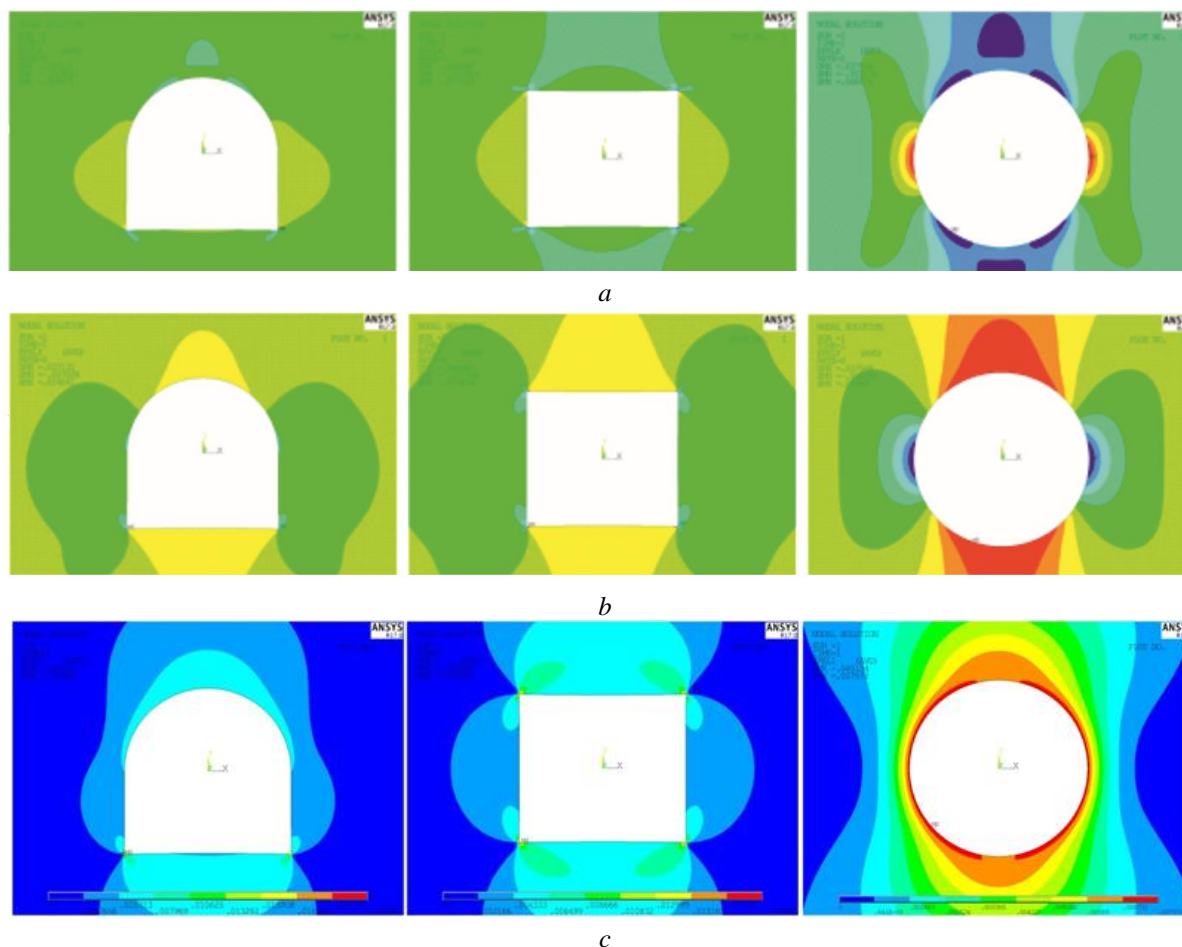


Рис. 3. Распределение деформаций: $a - \varepsilon_x$; $b - \varepsilon_y$; $c - \varepsilon_{int}$
Fig. 3. Distribution of strains: $a - \varepsilon_x$; $b - \varepsilon_y$; $c - \varepsilon_{int}$

После того, как получены распределения напряжений и деформаций в массиве с выработкой, можно приступить к оценке степени повреждаемости массива. Расчет объемной повреждаемости производился с помощью модели деформированного твердого тела с опасным объемом. Опасный объем есть ограниченная область, где напряжения или деформации превышают установленный порог. Кроме опасного объема, в качестве интегрального показателя состояния выработки может также использоваться повреждаемость опасного объема [1, 6–10].

Расчет объемной повреждаемости

Определение опасных объемов V_i как множеств элементарных объемов тела, в которых действующие напряжения не меньше предельных, а также формулы расчета их величин и повреждаемости Ψ_i для эквивалентных напряжений в общем случае имеют вид [1, 6, 8]:

$$\begin{aligned}
 V_q &= dV / \psi_q \geq 1, dV \subset V_k, \\
 V_q &= \int_{\psi_q \geq 1} dV, \quad q = x, y, z, 1, 2, 3, \text{int}, \\
 \Psi_q &= \int_{\psi_q \geq 1} \psi_q dV,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где $\Psi_q^i = \varepsilon_q^i / \varepsilon_q^{\text{lim}}$, $q = x, y, z, 1, 2, 3, \text{int}$;

dV – элементарный объем нагруженного тела;

V_k – рабочий объем нагруженного тела.

Расчет опасного объема и его повреждаемости проводился в конечно-элементном пакете ANSYS. Для этого была написана программа на языке APDL [1, 2]. Для каждого конечного элемента было рассчитано отношение действующих и предельных деформаций:

$$\Psi_q^i = \varepsilon_q^i / \varepsilon_q^{\text{lim}}, q = x, y, \text{int}. \quad (2)$$

Элементы, для которых данное отношение превышает единицу, и будут образовывать опасный объем для всей рассматриваемой модели. В итоге имеем список элементов, входящих в состав опасного объема, а также его величину.

Для каждой рассматриваемой глубины залегания выработки были рассчитаны опасные площади (опасный объем V в двумерной постановке становится опасной площадью S). Результаты расчетов при $H = 500$ м представлены на рис. 4. Видно, что при оценке деформаций ε_x основная часть площади локализуется в районе боков выработки, при оценке деформаций ε_y – только над кровлей и в почве, а по ε_{int} – вокруг всего контура выработки.

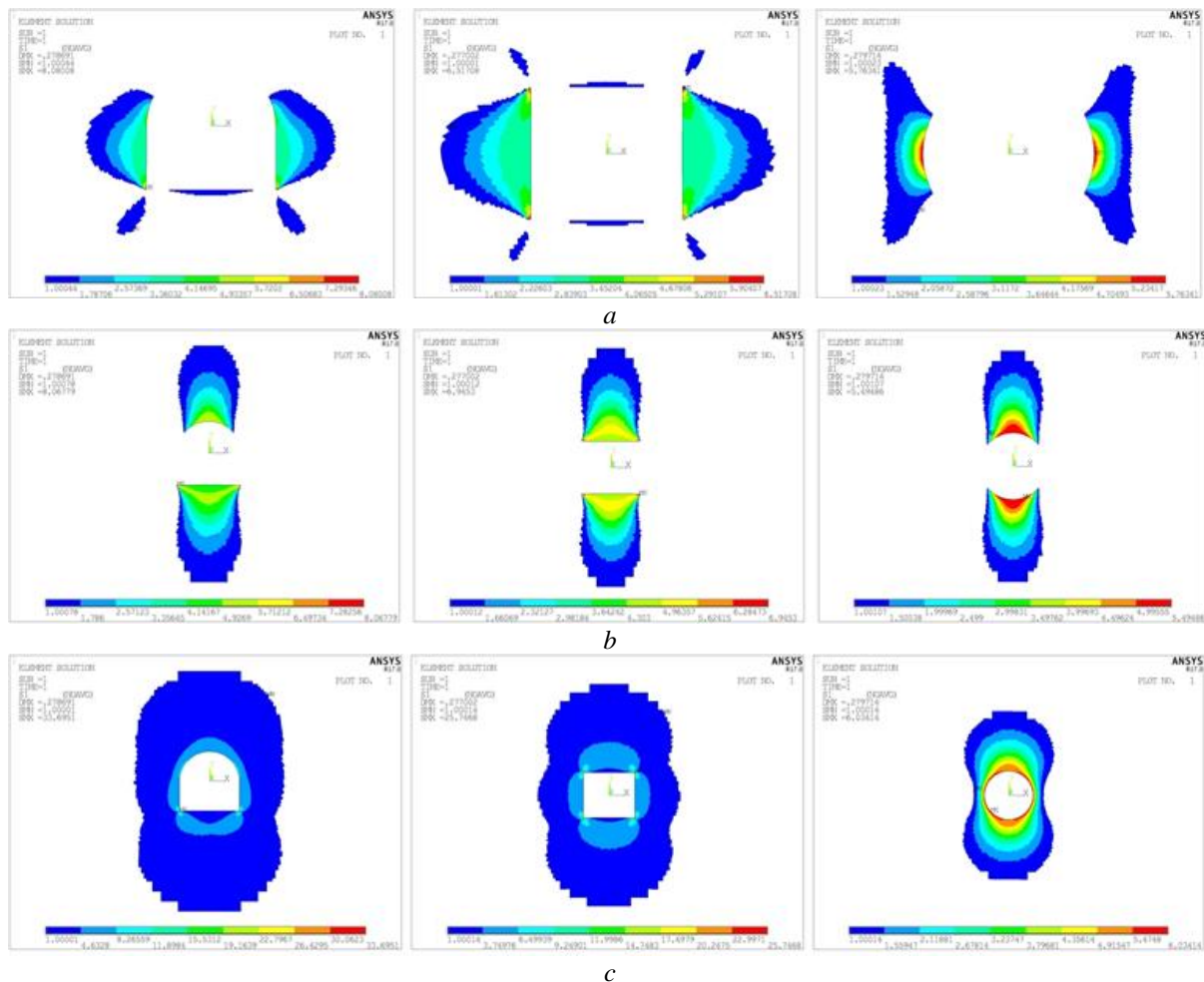


Рис. 4. Опасные площади для: $a - \Psi_x = \varepsilon_x / \varepsilon_x^{\text{lim}}$; $b - \Psi_y = \varepsilon_y / \varepsilon_y^{\text{lim}}$; $c - \Psi_{\text{int}} = \varepsilon_{\text{int}} / \varepsilon_{\text{int}}^{\text{lim}}$

Fig. 4. Dangerous areas for: $a - \Psi_x = \varepsilon_x / \varepsilon_x^{\text{lim}}$; $b - \Psi_y = \varepsilon_y / \varepsilon_y^{\text{lim}}$; $c - \Psi_{\text{int}} = \varepsilon_{\text{int}} / \varepsilon_{\text{int}}^{\text{lim}}$

На рис. 5, 6 представлены зависимости опасной площади и объемной повреждаемости от глубины залегания выработки. Видно, что с ростом глубины залегания выработки опасная площадь и повреждаемость увеличиваются, величина опасной площади для прямоугольной формы значительно больше, чем величина опасной площади для арочной и круглой форм. Кривые имеют схожую форму, и на всех рассматриваемых глубинах наибольшее значение

повреждаемость Ψ имеет для выработки прямоугольной формы, а наименьшее – для круглой. Анализ опасных площадей по деформациям ε_{int} показал, что в среднем величина опасной площади круглой выработки меньше арочной и прямоугольной на 9 и 17 % соответственно.

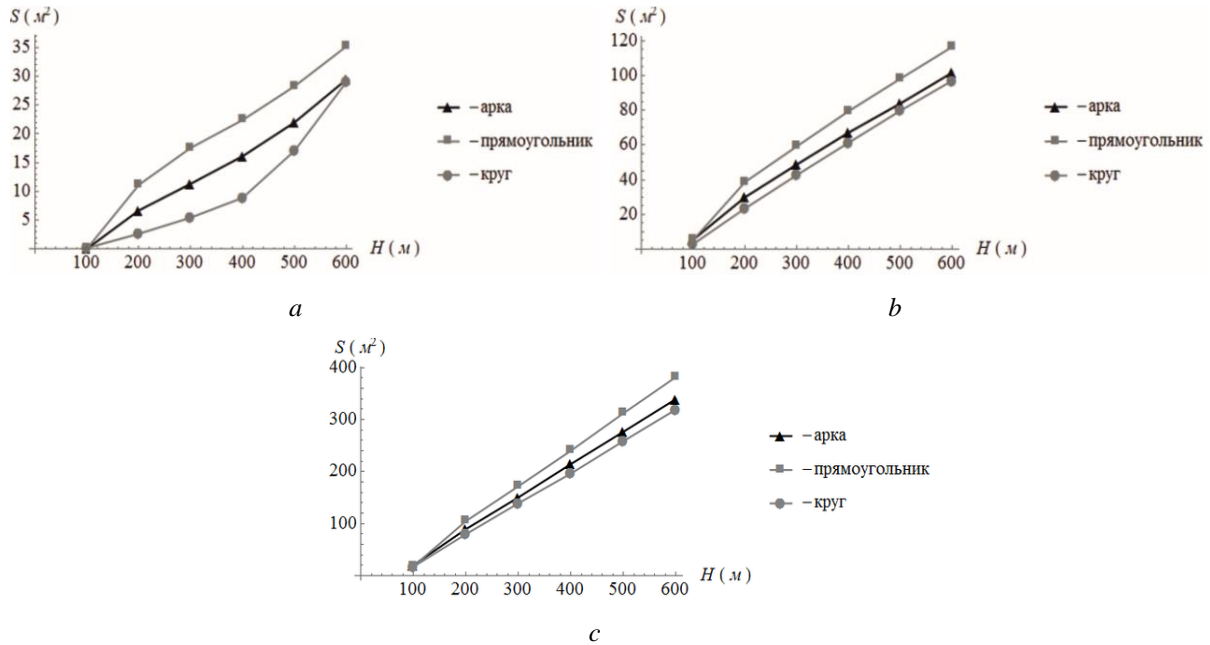


Рис. 5. Зависимость опасной площади от глубины залегания выработки для:

$$a - \Psi_x = \varepsilon_x / \varepsilon_x^{\lim}; b - \Psi_y = \varepsilon_y / \varepsilon_y^{\lim}; c - \Psi_{int} = \varepsilon_{int} / \varepsilon_{int}^{\lim}$$

Fig. 5. The dependence of dangerous area on the depth of mine roadway work for:

$$a - \Psi_x = \varepsilon_x / \varepsilon_x^{\lim}; b - \Psi_y = \varepsilon_y / \varepsilon_y^{\lim}; c - \Psi_{int} = \varepsilon_{int} / \varepsilon_{int}^{\lim}$$

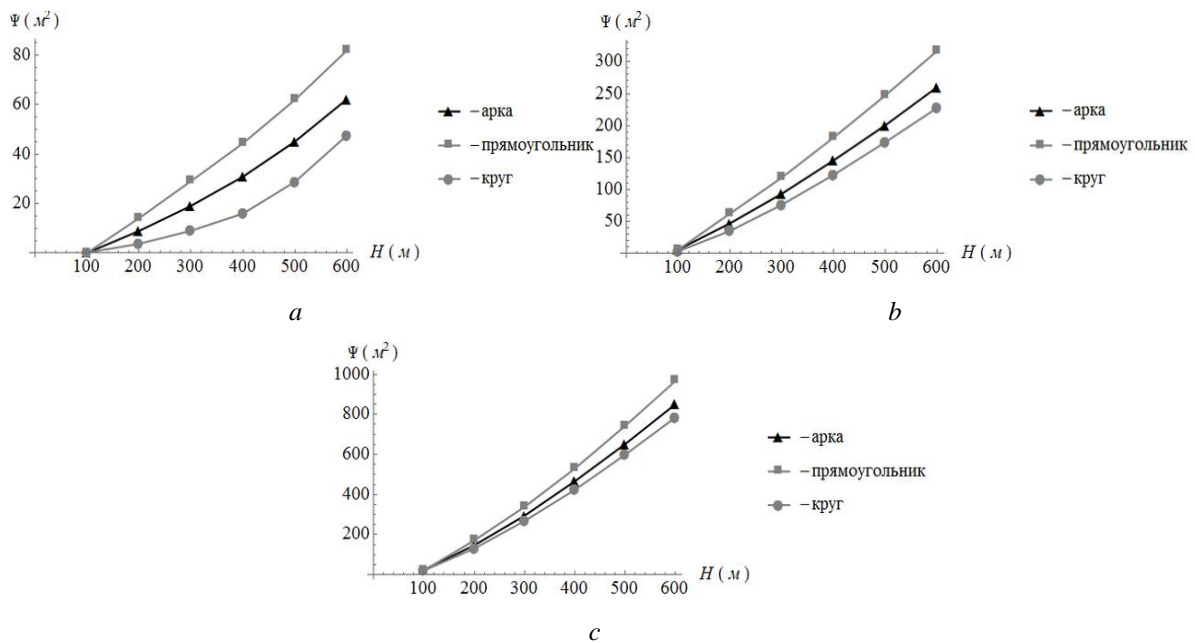


Рис. 6. Зависимость объемной повреждаемости от глубины залегания выработки для:

$$a - \Psi_x = \varepsilon_x / \varepsilon_x^{\lim}; b - \Psi_y = \varepsilon_y / \varepsilon_y^{\lim}; c - \Psi_{int} = \varepsilon_{int} / \varepsilon_{int}^{\lim}$$

Fig. 6. The dependence of integral damageability from the depth of mining work for:

$$a - \Psi_x = \varepsilon_x / \varepsilon_x^{\lim}; b - \Psi_y = \varepsilon_y / \varepsilon_y^{\lim}; c - \Psi_{int} = \varepsilon_{int} / \varepsilon_{int}^{\lim}$$

Заключение

В работе были представлены результаты компьютерного моделирования НДС и объемной повреждаемости в окрестности горной выработки с различной формой поперечного сечения (арочная, прямоугольная, круглая). Оценка объемной повреждаемости проводилась с помощью модели деформированного твердого тела с опасным объемом. Разработанный метод оценки повреждаемости в окрестности подземной выработки учитывает различные формы сечения выработки и глубины ее залегания. Было показано, что для глубин от 100 до 600 м повреждаемость для круглой выработки в среднем меньше повреждаемости для прямоугольной и арочной на 9 и 17 % соответственно при оценке опасных объемов по интенсивности деформаций.

Список литературы

1. Журавков М.А., Щербаков С.С., Шемет Л.А. Объемная повреждаемость окрестности горной выработки. *Актуальные вопросы машиноведения*. 2016;5:184-186.
2. Журавков М.А., Щербаков С.С., Шемет Л.А. Опасные объемы в окрестности выработки в горном массиве. *Вестник БелГУТа: наука и транспорт*. 2016;1(32):83-90.
3. Оловянный А.Г. *Механика горных пород. Моделирование разрушений*. С.-Петербург: ООО «Издательско-полиграфическая компания «КОСТА»; 2012.
4. Журавков М.А., Коновалов О.Л., Богдан С.И., Прохоров П.А., Круподеров А.В. *Компьютерное моделирование в геомеханике*. Минск: БГУ; 2008.
5. Журавков М.А. *Фундаментальные решения теории упругости и некоторые их применения в геомеханике, механике грунтов и оснований*. Минск: БГУ; 2008.
6. Щербаков С.С., Сосновский Л.А. *Механика трибофатических систем*. Минск: БГУ; 2011.
7. Журавков М.А., Щербаков С.С., Мармыш Д.Е., Шемет Л.А., Насань О.А. Опасные объемы как мера повреждаемости системы на макро- и микроуровне. *Актуальные вопросы машиноведения*. 2015;4:237-240.
8. Сосновский Л.А. *Механика износоусталостного повреждения*. Гомель: БелГУТ; 2007.
9. Сосновский Л.А., Щербаков С.С. *Сюрпризы трибофатики*. Гомель: БелГУТ; 2005.
10. Bahdanovich A., Bendikiene R., Cesnavicius R., Ciuplys A., Grigas V., Jutas A., Marmysh D., Mazaleuski A., Nasan A., Shemet L., Sherbakov S., Spakauskas K., Sosnovskiy L. Research on Tensile Behaviour of New Structural Material MoNiCa. *Materials Science (Medžiagotyra)*. 2019;25(3):292-296. DOI: 10.5755/j01.ms.25.3.23079.

References

1. Zhuravkov M.A., Shcherbakov S.S., Shemet L.A. [Volumetric damageability in the mining work neighbourhood]. *Aktual'nye voprosy mashinovedeniia = Actual issues of engineering*. 2016;5:184-186. (In Russ.)
2. Zhuravkov M.A., Sherbakov S.S., Shemet L.A. [Dangerous volumes in the neighborhood of the mining work in rock massif]. *Vestnik BelGUTA: Nauka i transport = Vestnik BelGUTA: science and transport*. 2016;1(32):83-90. (In Russ.)
3. Oloviannyi A.G. [Rock mechanics. Destruction modeling]. St.-Peterburg: ООО "Izdatel'sko-poligraficheskaiа kompaniia "KOSTA"; 2012. (In Russ.)
4. Zhuravkov M.A., Konovalov O.L., Bogdan S.I., Prokhorov P.A., Krupoderov A.V. [Computer modeling in geomechanics]. Minsk: BGU; 2008. (In Russ.)
5. Zhuravkov M.A. [Fundamental solutions of the theory of elasticity and some of their applications in geomechanics, soil and foundation mechanics]. Minsk: BGU; 2008. (In Russ.)
6. Shcherbakov S.S., Sosnovskii L.A. [Mechanics tribo-fatigue systems]. Minsk: BGU; 2011. (In Russ.)
7. Zhuravkov M.A., Shcherbakov S.S., Marmysh D.E., Shemet L.A., Nasan A.A. [Dangerous volumes as the measure of system damageability on macro and microlevel]. *Aktual'nye voprosy mashinovedeniia = Actual issues of engineering*. 2015;4:237-240. (In Russ.)
8. Sosnovskii L.A. [Fatigue Damage Mechanics]. Gomel: BelGUT; 2007. (In Russ.)
9. Sosnovskii L.A., Shcherbakov S.S. [Surprises of Tribo-Fatigue]. Gomel: BelGUT; 2005. (In Russ.)
10. Bahdanovich A., Bendikiene R., Cesnavicius R., Ciuplys A., Grigas V., Jutas A., Marmysh D., Mazaleuski A., Nasan A., Shemet L., Sherbakov S., Spakauskas K., Sosnovskiy L. Research on Tensile Behaviour of New Structural Material MoNiCa. *Materials Science (Medžiagotyra)*. 2019;25(3):292-296. DOI: 10.5755/j01.ms.25.3.23079.

Вклад авторов

Щербаков С.С. разработал методику подсчета опасного объема и объемной повреждаемости в окрестности горной выработки.

Шемет Л.А. создала компьютерную программу для расчетов опасных объемов в окрестности горной выработки.

Насань О.А. разработал компьютерную модель и выполнил расчет напряженно-деформированного состояния горного массива с выработкой.

Authors' contribution

Sherbakov S.S. developed a methodology for calculating dangerous volume and volumetric damageability in the neighbourhood of a mine roadway.

Shemet L.A. created a computer program for calculating dangerous volumes in the neighbourhood of a mine roadway.

Nasan A.A. developed a computer model and performed the calculation of the stress-strain state of the rock massif with a mine roadway.

Сведения об авторах

Щербаков С.С., д.ф.-м.н., профессор, заместитель Председателя Государственного комитета по науке и технологиям Республики Беларусь, профессор кафедры теоретической и прикладной механики Белорусского государственного университета (совместительство).

Шемет Л.А., старший преподаватель кафедры теоретической и прикладной механики Белорусского государственного университета.

Насань О.А., старший преподаватель кафедры теоретической и прикладной механики Белорусского государственного университета.

Адрес для корреспонденции

220030, Республика Беларусь,
г. Минск, пр-т Независимости, 4,
Белорусский государственный университет
тел. +375-33-313-04-94;
e-mail: shemetla@yandex.ru
Шемет Людмила Александровна

Information about the authors

Sherbakov S.S., D.Sci, Professor, Vice Chairman of the State Committee on Science and Technology of the Republic of Belarus, Professor of the Department of Theoretical and Applied Mechanics of Belarusian State University (concurrently).

Shemet L.A., Senior lecturer of the Department of Theoretical and Applied Mechanics of Belarusian State University.

Nasan A.A., Senior lecturer of the Department of Theoretical and Applied Mechanics of Belarusian State University.

Address for correspondence

220030, Republic of Belarus,
Minsk, Nezavisimosti ave., 4,
Belarusian State University
tel. +375-33-313-04-94;
e-mail: shemetla@yandex.ru
Shemet Liudmila Alexandrovna