ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2021;(6):84-94
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.831; 622,2; 622.235 DOI: 10.25018/0236_1493_2021_6_0_84

ПРОГНОЗ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТРЕЩИН РАСТЯЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД

Нгуен Ван Минь[1], А.Р. Умаров[1], А.М. Янбеков[1], Ч.В. Хажыылай[1]

[1] ГИ НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: minhnv@utt.edu.vn, flek1231998@mail.ru

Аннотация: В натурных условиях, особенно на больших глубинах, вокруг выработок наблюдается возникновение слоев параллельных трещин. Эти трещины называются трещинами растяжения, которые возникают от воздействия сил сжатия. Данный вид разрушения относится не к сдвигу, а к растяжению. Значение растягивающей деформации массива горных пород, при которой образуются и развиваются трещины, позволяет определить потенциал нестабильности горной массы вокруг выработок. Критическое значение деформации растяжения горных пород имеет практическую значимость при определении размеров зон растягивающих деформаций и является важным параметром при выборе анкеров для закрепления их замковой части в устойчивой части массива. В этой статье были составлены математические уравнения для прогнозирования порога образования (ε_{ci}) и распространения (ε_{cd}) трещин растяжения на основе физико-механических свойств горных пород (прочности на сжатие, коэффициента Пуассона и модуля упругости). Для проверки достоверности установленного математического уравнения значения ε_{ci} и ε_{cd} сравнивались с результатами, полученными с помощью метода калибровки численной модели в сочетании с фактическими наблюдениями в рудниках. Математические уравнения устанавливаются на основе физико-механических свойств образца при сжатии и проверяются с учетом циклической численной калибровки следующим образом: моделирование → наблюдение → калибровка.

Ключевые слова: растягивающие деформации, метод калибровки, арочная выработка, глубина разработок, прогноз, мощность, зона растягивающих деформаций, горная порода, программы Map3D и RocData, возникновение, распространение, трещины растяжения.

Для цитирования: *Нгуен Ван Минь, Умаров А. Р., Янбеков А. М., Хажыылай Ч. В.* Прогноз возникновения и распространения трещин растяжения на основе физико-механических свойств горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 6. – С. 84–94. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_6_0_84.

Prediction of initiation and propagation of tensile fractures based on physical and mechanical properties of rocks

Nguyen Van Minh[1], A.R. Umarov[1], A.M. Yanbekov[1], C.V. Khazhyylai[1]

[1] Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia, e-mail: minhnv@utt.edu.vn, flek1231998@mail.ru

© Нгуен Ван Минь, А.Р. Умаров, А.М. Янбеков, Ч.В. Хажыылай. 2021.

Abstract: In full-scale conditions, especially at great depths, layers of parallel fractures are often observed. These fractures are called the tensile fractures induced by compression. This kind of fracture is not shearing but tension. The value of the tensile strain which initiates and pushes fractures makes it possible to determine the instability potential of rock mass around an underground excavation. The critical tensile strain value of rocks is important for determining tensile strain zone sizes and for choosing rock bolts with bearing plates to be fixed in stable rocks. In this study, the mathematical equations were constructed for the prediction of initiation threshold (ε_{ci}) and propagation threshold (ε_{cd}) for tensile fractures based on the physical and mechanical properties of rocks (compression strength, Poisson's ratio and elasticity modulus). Reliability of the constructed mathematical equation was checked by comparing the values of ε_{ci} and ε_{cd} with the numerical model calibration results and with actual mine observations. The mathematical equations are constructed based on the physical and mechanical properties of rock samples in compression and are checked with regard to the cyclic numerical calibration as follows: modeling → observation → calibration.

Key words: tensile strains, calibration method, arched roadway, mining depth, prediction, thickness, tensile strain zone, rock, Map3D and RocData, initiation, propagation, tensile fractures.

For citation: Nguyen Van Minh, Umarov A. R., Yanbekov A. M., Khazhyylai C. V. Prediction of initiation and propagation of tensile fractures based on physical and mechanical properties of rocks. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(6):84-94. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_6_0_84.

Введение

Добыча руды на большой глубине сопровождаются проблемами, связанными с горным давлением. Подземные разработки достигают глубины более 1 км от поверхности земли, что влечет за собой усложнение горно-геологических условий, которые, в свою очередь, оказывают негативное влияние на устойчивость элементов горных конструкций [1–6]. Геотехнический мониторинг участков рудников (рудники Таймырский, Октябрьский, Интернациональный) показывает, что все механизмы разрушения возникают при высоких сжимающих напряжениях и образуются в плоскости, перпендикулярной минимальному главному напряжению σ_3, кроме того, вокруг выработок наблюдаются возникшие слои параллельных трещин. Данный тип разрушения называют растрескиванием [7–11]. В настоящее время общепризнанным является тот факт, что эти трещины, называемые трещинами растяжения, возникают под воздействием сил сжатия. Этот процесс определяется критерием растягивающей деформации [10], согласно которому «порода начинает разрушаться при всестороннем сжатии, когда растягивающее напряжение превышает определенный предел прочности данной породы», т.е.

$$\varepsilon_3 \geqslant \varepsilon_c \qquad (1)$$

где ε_3 – растягивающая деформация; ε_c – критическое значение растягивающей деформации.

Трехмерное уравнение для выражения растягивающей деформации выглядит следующим образом [10]:

$$\varepsilon_3 = \frac{1}{E}\left[\sigma_3 - \nu\left(\sigma_1 + \sigma_2\right)\right] \qquad (2)$$

σ_1, σ_2, σ_3 – основные напряжения; E – модуль упругости; ν – коэффициент Пуассона.

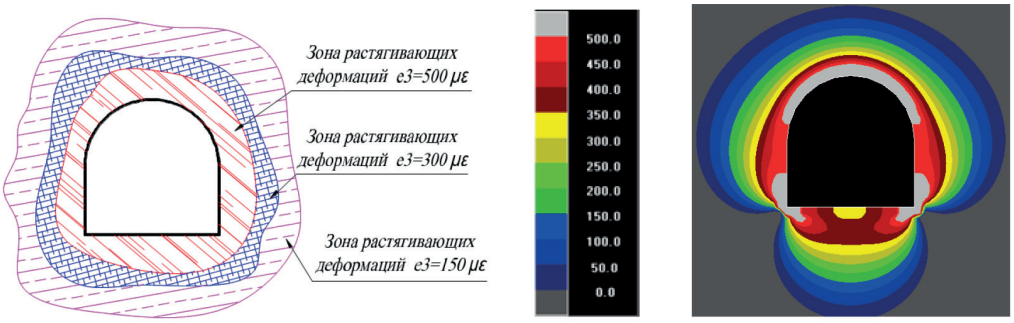


Рис. 1. Определение зон растягивающих деформаций вокруг выработок
Fig. 1. Determination of tensile strain zones in rock mass around underground excavations

Следовательно, прогнозирование мощности зоны растягивающих деформаций позволяет принять решение об оптимальной системе крепления и поддержания горных выработок (рис. 1).

С помощью численного моделирования можно спрогнозировать зоны растягивающих деформаций [12]. В данном исследовании использовался программный комплекс численного моделирования Map3D.

Порядок проведения исследований и результаты

Шаг 1: Определение значения критерия растягивающих деформаций ε_c в стадии возникновения и распространения трещин растяжения

На рис. 2 показана кривая напряжения-деформации для хрупких горных пород при сжатии, разделенная на четыре области: в области *AB* появляются видимые микротрещины, оси которых параллельны направлению действия главного напряжения; область *BC* показывает, что с увеличением напряжения увеличивается и количество микротрещин; в точке предела прочности образца в центральной части развивается плоскость макроскопического разрушения. При дальнейшем сжатии эта плоскость разрушения увеличивается к одному или

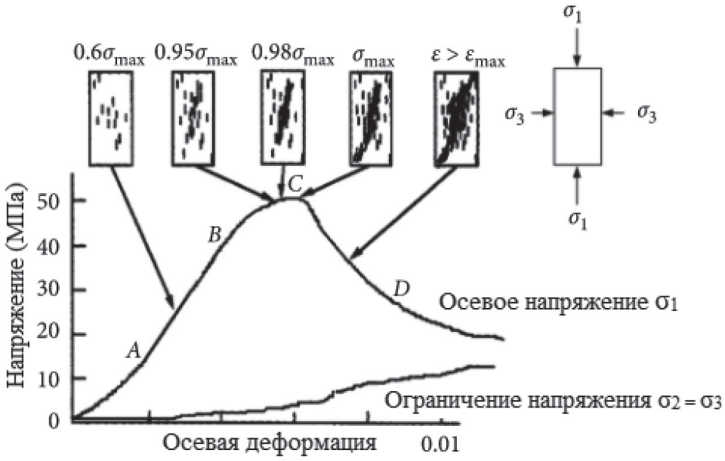


Рис. 2. Кривая напряжения-деформации образцов глинистого кварцита и рисунки образования трещин, наблюдаемых на образцах [13]
Fig. 2. Stress–strain curves for clayey quartzite samples and fracture patterns observed in samples

обоим концам образца за счет роста и распространения существующих микротрещин; в области *BC* микротрещины начинают сливаться вдоль плоскости и образовывать макроскопическую «плоскость» разрушения в точке *C*; в последней области *CD* плоскость разрушения проходит через весь образец [13].

Для хрупких горных пород максимальная основная деформация ε_1 должна быть в направлении σ_1, промежуточная главная деформация ε_2 в направлении σ_2 и минимальная главная деформация ε_3 в направлении σ_3. В соответствии с законом Гука:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E_c}\left\{\sigma_1 - \nu_c\left(\sigma_2 + \sigma_3\right)\right\} \qquad (3)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E_c}\left\{\sigma_2 - \nu_c\left(\sigma_1 + \sigma_3\right)\right\} \qquad (4)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{1}{E_c}\left\{\sigma_3 - \nu_c\left(\sigma_1 + \sigma_2\right)\right\} \qquad (5)$$

Прочность на одноосное растяжение породы σ_t, критическая деформация растяжения, соответствующая σ_t, равна ε_u. Для хрупких горных пород в стадии предразрушения:

$$\varepsilon_u = \frac{\sigma_t}{E_t} \qquad (6)$$

В состоянии трехосного сжатия деформации в направлениях σ_2 и σ_3 должны быть ε_2 и ε_3 соответственно, т.к. σ_1 максимально. Для теории малых деформаций значение $\varepsilon_2 + \varepsilon_3$ фактически обозначает скорость расширения σ_1-плоскости [14].

Как показано на рис. 3, *S* — это начальная площадь поперечного сечения до приложения нагрузки. А ΔS означает увеличение площади после приложения нагрузки. Скорость расширения σ_1-плоскости может быть рассчитана следующим образом [14]:

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{\left(l + \Delta l_1\right)\cdot\left(l + \Delta l_2\right) - l^2}{l^2} = \\ = \frac{\Delta l_1}{l} + \frac{\Delta l_2}{l} + \frac{\Delta l_1}{l}\frac{\Delta l_2}{l} = \\ = \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_2\varepsilon_3 \approx \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \qquad (7)$$

Разрушение произойдет при достижении удвоенной максимальной деформации растяжения.

$$\varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 2\varepsilon_u = 2\frac{\sigma_t}{E_t} \qquad (8)$$

Для состояния одноосного сжатия $\sigma_1 = \sigma_c$ и $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, где σ_c — прочность на одноосное сжатие. Подставляя уравнения (4) и (5) в уравнение (8), получаем:

$$\sigma_t = -\frac{\nu_c \cdot E_t}{E_c}\sigma_c \qquad (9)$$

Для большинства материалов физико-механические свойства в основном

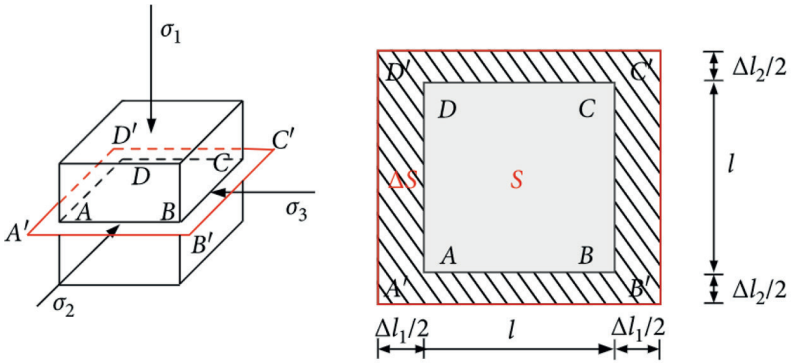


Рис. 3. Деформация поперечного сечения
Fig. 3. Deformation of cross section

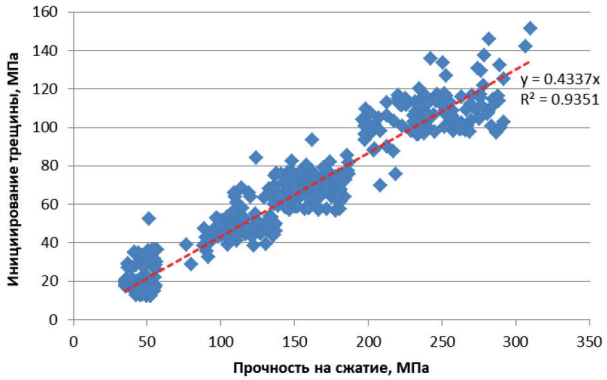


Рис. 4. Взаимосвязь между $\sigma_{сж}$ и σ_{ci} на стадии возникновения
Fig. 4. Relationship of σ_{com} and σ_{ci} at fracture initiation stage

подчиняются следующему соотношению [15]:

$$\frac{\nu_c}{E_c} = \frac{\nu_t}{E_t} = \frac{\nu}{E} \qquad (10)$$

Таким образом, уравнение (9) принимает вид:

$$\sigma_t = -\nu_t \cdot \sigma_c \qquad (11)$$

$$\sigma_t = E_t \cdot \varepsilon_t = -\nu_t \cdot \sigma_c \qquad (12)$$

$$\varepsilon_t = -\frac{\nu_t \cdot \sigma_c}{E_t} = -\frac{\nu}{E}\sigma_c \qquad (13)$$

В соотношении напряжение-деформация, показанном на рис. 2, σ_{ci} — уровень напряжения инициирования трещины, а σ_{cd} — уровень напряжения распространения трещины, близкий к максимальной прочности породы [13].

Математическая формула для определения критической деформации растяжения на стадии образования, а затем распространения трещин с использованием порога инициирования (σ_{ci}) и распространение трещин (σ_{cd}):

$$\frac{\sigma_{ci} \cdot \nu}{E} \le \varepsilon_A < \frac{\sigma_{cd} \cdot \nu}{E} \qquad (14)$$

Формула взаимосвязи между $\sigma_c - \sigma_{ci}$ и $\sigma_c - \sigma_{cd}$ была разработана на основе обобщения экспериментальных результатов для горных пород, которые были выполнены многими авторами и опубликованы в научных журналах [16–19]. Результаты корреляции $\sigma_{сж}$ и σ_{ci} на рис. 4 и корреляция $\sigma_{сж}$ и σ_{cd} на рис. 5.

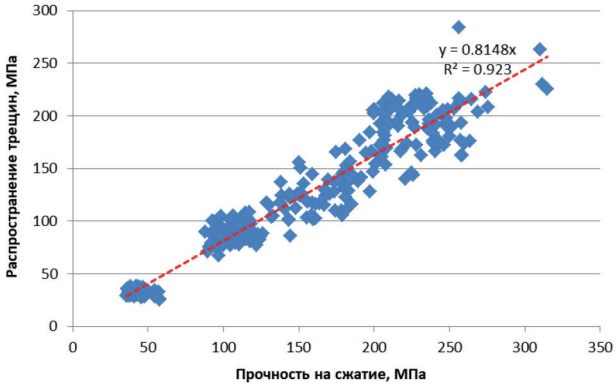


Рис. 5. Взаимосвязь между $\sigma_{сж}$ и σ_{cd} на стадии распространения
Fig. 5. Relationship of σ_{com} and σ_{cd} at fracture propagation stage

Таблица 1

Физико-механические свойства габбро-долерита
Physical and mechanical properties of gabbro-dolerite

Название породы	Количество испытаний	Плотность, г/см³	Предел прочности, МПа	Модуль упругости, МПа	Коэффициент Пуассона
Габбро-долерит	1	2,985	179,17	107 000	0,33
	2	2,971	109,43	104 000	0,27
	3	2,954	155,06	113 000	0,38
	4	2,854	103,22	109 000	0,31
	5	2,901	141,90	122 000	0,35
Среднее значение		2,933	137,756	111 000	0,328
Стандартное отклонение		0,049	28,379	6228,965	0,037

Таким образом, математические уравнения определяют возникновение (ε_{ci}) и распространение (ε_{cd}) трещин растяжения по формуле:

$$\varepsilon_c^{ci} = \frac{0,434 \cdot \sigma_c \cdot \nu}{E} \text{ и } \varepsilon_c^{cd} = \frac{0,815 \cdot \sigma_c \cdot \nu}{E} \quad (15)$$

Шаг 2: Прогноз мощности зон растягивающих деформаций вокруг выработок с помощью программы Map3D

Рассматриваемый участок горных пород трещиноватый, измененный, хлоритизированный и серпентинированный, категория нарушенности массива IIIа. Трещины имеют шероховатую поверхность или гладкую с ровными бороздами скольжения, заполнены вторичными ослабляющими минералами: хлоритом, серпентином, ангидритом и кальцитом. Угол падения трещин субвертикальный 40 — 60°. На северо-востоке вскрыто тектоническое нарушение с азимутом простирания 354° и углом падения 60 — 70°, мощностью до 2 м. Нарушение представляет собой зону перетертых, участками раздробленных и хлоритизированных горных пород.

Форма выработок в расчетах принималась арочная. Проектная высота выработок вчерне — 6,32 м, ширина — 5,71 м.

В табл. 1 представлены физико-механические свойства вмещающей горной породы габбро-долерита, определенные в лабораторных условиях при испытании образцов горной породы. Для определения прочности исследуемого массива горных пород, находящегося в естественных условиях, использовался критерий прочности Хука-Брауна в программе RocData (табл. 2). При расчетах

Таблица 2

Результаты определения свойств габбро-долерита в программе RocData
Determination of gabbro-dolerite properties in RocData

Параметр	Значение
Предел прочности на одноосное сжатие, МПа	95,7
Модуль упругости, МПа	63 741
Коэффициент Пуассона	0,33
Параметр Хука-Брауна, mb	14,07
Параметр Хука-Брауна, s	0,12

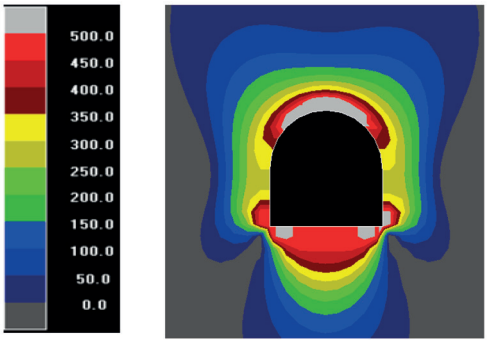


Рис. 6. Определение микродеформаций с помощью численного моделирования в программном комплексе Map3D

Fig. 6. Determination of microstrains by numerical modeling in Map3D

задавался исходный параметр GSI = 65 (индекс геологической прочности массива), а также параметр D = 0,5 для условий проходки выработки буровзрывным способом (индекс техногенной нарушенности массива).

Используя значения экспериментальных результатов в табл. 1 в уравнении (15), полученные результаты ε_c = 178÷÷334 με, приблизительное значение ε_c = = 180 με и $\varepsilon_з$ = 350 με применим в расчетах.

На рис. 6 показаны результаты численного моделирования для свойств массива, представленных в табл. 2.

С учетом полученных результатов численного моделирования установлено, что зоны растягивающих деформаций (зоны возможного обрушения массива) со значениями 350 με формируются в кровле выработки на расстоянии от контура выработки: $H_{кр.}$ = 0,91 м.

Шаг 3: Результат прогноза критерия растягивающих деформаций ε_c и его зоны будут сравниваться с методом калибровки численной модели.

С целью определения надежности уравнения (15) для прогноза критического значения деформации, вычисленные результаты из уравнения (15) будут сопоставляться с методом калибровки численной модели.

В этой статье изменялись показатели σ_c, ν . E для калибровки результатов зоны растягивающих деформаций численной модели с результатами наблюдаемой зоны микротрещин в выработке.

На рис. 7 показаны результаты схемы трещин вокруг выработки рудника.

При проведении натурных исследований составляются планы измеренных трещин в массиве. Скорректированные результаты численного моделирования представлены на рис. 8 и значения, полученные с учетом калибровки, в табл. 3.

После калибровки схема трещин в кровле выработки согласуется с зоной растягивающих деформаций, полученных с помощью численной модели Map3D. На рис. 8, результаты показыва-

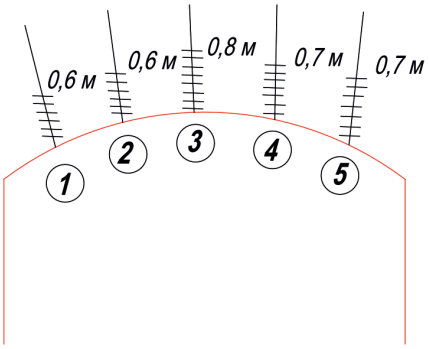


Рис. 7. Схема трещин в кровле выработки рудника

Fig. 7. Fracture pattern in mine roof

Таблица 3

Изменение свойств породы после калибровки

Change in properties of rocks after calibration

Название пород	Предел прочности, МПа	Модуль упругости, МПа	Коэффициент Пуассона
Габбро-долерит	75,3	58207	0,26

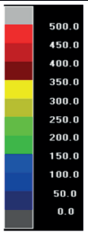
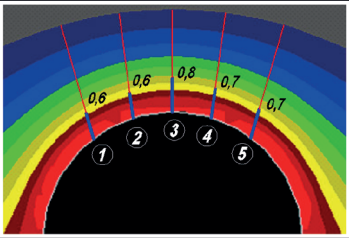
εз, με	Результат	Комментарий
		Отрезки 1, 2, 4 и 5 достигают 350 με; отрезок 3 находится на контуре 300 με.

Рис. 8. Результаты зоны растягивающих деформаций после калибровки
Fig. 8. Tensile strain zones after calibration

ют, что разрушение породы может развиваться из зон растягивающих деформаций со значениями ⩾ 350 με. Поэтому можно предположить, что критическая деформация растяжения в нашем случае составляет около ε_c = 150÷175 με.

Результаты сравнения математических уравнений и методов численной калибровки показали, что:

• Математические расчеты указывают на то, что предельное значение деформации на стадии образования трещины составляет 178 με (при ε_{ci} = 180 με), а на стадии распространения трещины 334 με (при ε_{cd} = 350 με); Результат калибровки численной модели для значения растягивающих деформаций составляет 350 με, а значение предельного значения растягивающей деформации составляет 150÷175 με.

• На руднике расстояние от кровли до зоны зарождения трещины составило 0,8 м. В программе Map3D на основе результатов моделирования размера зон растягтвающих деформаций и на основе прогнозируемого значения 350 με из математического уравнения расстояние от кровли до границы зоны растягивающих деформаций 350 με составляет примерно 0,91 м.

Выводы

В рамках исследования были получены следующие результаты и сделаны выводы:

1. Были составлены математические уравнения для прогнозирования порога образования и распространения трещин растяжения на основе физико-механических свойств горных пород (прочность на сжатие, коэффициент Пуассона и модуль упругости). Математическое уравнение для определения величины растягтвающих деформаций на стадии образования (ε_{ci}) и распространения (ε_{cd}) трещин растяжения выглядит следующим образом:

$$\varepsilon_c^{ci} = \frac{0,434 \cdot \sigma_c \cdot \nu}{E}$$

и

$$\varepsilon_c^{cd} = \frac{0,815 \cdot \sigma_c \cdot \nu}{E}$$

2. С помощью калибровки численной модели сопоставлялись расстояния от кровли до первой трещины в массиве на рудниках и расстояние от кровли до зоны растягивающих деформаций (зоны возможного обрушения массива) в численной модели Map3D.

3. Результаты прогноза значений деформации из математических уравнений ε_{ci} и ε_{cd} сравнивались с результатами для значения $\varepsilon_з$ методом калибровки численной модели. Уравнение следует применять на рудниках глубиной более 1 км и проводить дополнительные исследования для повышения надежности математических вычислений на других рудниках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Guzev M. A., Odintsev V. N., Makarov V. V.* Principals of geomechanics of highly stressed rock and rock massifs // Tunnelling and Underground Space Technology. 2018, vol. 81, pp. 506 — 511.

2. *Joughin W. C.* Dealing with uncertainty and risk in the design of deep and high stress mining excavations / Proceedings of the Eighth International Conference on Deep and High Stress Mining, Australian Centre for Geomechanics, Perth. 2017, pp. 489 — 507. DOI: 10.36487/ACG_rep/1704_33.3_Joughin.

3. *Wagner H.* Deep mining: a rock engineering challenge // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2019, vol. 52, pp. 1417–1446. DOI: 10.1007/s00603-019-01799-4.

4. *Eberhardt E., Stead D., Stimpson B., Read R. S.* Identifying crack initiation and propagation thresholds in brittle rock // Canadian Geotechnical Journal. 1988, vol. 35, no. 2, pp. 222 — 233. DOI: 10.1139/cgj-35-2-222.

5. *Barton N., Shen B.* Risk of shear failure and extensional failure around over-stressed excavations in brittle rock // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2017, vol. 9, no. 2, pp. 210 — 225. DOI: 10.1016/j.jrmge.2016.11.004.

6. *Kuijpers J.* Fracturing around highly stressed excavations in brittle rock // Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. 2000, vol. 100, pp. 325–332.

7. *Лушников В. Н.*, *Сэнди М. П.*, *Еременко В. А.*, *Коваленко А. А.*, *Иванов И. А.* Методика определения зоны распространения повреждения породного массива вокруг горных выработок и камер с помощью численного моделирования // Горный журнал. — 2013. — № 12. — С. 11–16.

8. *Еременко В. А.*, *Аксенов З. В.*, *Пуль Э. К.*, *Захарова Н. Е.* Исследование структуры вторичного поля напряжений призабойной части подготовительных выработок при проходке выбросоопасных пластов с использованием программы Map3D // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 5. — С. 91 — 104. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-91-104.

9. *Еременко В. А.*, *Айнбиндер И. И.*, *Марысюк В. П.*, *Наговицин Ю. Н.* Разработка инструкции по выбору типа и параметров крепи выработок рудников Талнаха на основе количественной оценки состояния массива // Горный журнал. — 2018. — № 12. — С. 101 — 106. DOI: 10.17580/gzh.2018.10.18.

10. *Stacey T. R.* A simple extension strain criterion for fracture of brittle rock // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 1981, vol. 18, pp. 469–474. DOI: 10.1016/0148-9062(81)90511-8.

11. *Галченко Ю. П.*, *Лейзер В. И.*, *Высотин Н. Г.*, *Якушева Е. Д.* Обоснование методики лабораторных исследований вторичного поля напряжений при создании и применении конвергентной горной технологии подземной разработки каменной соли // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 11. — С. 35–47. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-0-35-47.

12. *Нгуен Ван Минь*, *Еременко В. А.*, *Лейзер В. И.*, *Сухорукова М. А.*, *Шерматова С. С.* Определение размеров зон растягивающих деформаций во вмещающем массиве подготовительных выработок // Инженерная физика. — 2020. — № 7. — С. 39–48. DOI: 10.25791/infizik.07.2020.1148.

13. *Hallbauer D. K., Wagner H., Cook N. G. W.* Some observations concerning the microscopic and mechanical behaviour of quartzite specimens in stiff, triaxial compression tests // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 1973, vol. 10, pp. 713–726. DOI: 10.1016/0148-9062(73)90015-6.

14. *Aizhong Lu, Ning Zhang, Guisen Zeng* An extension failure criterion for brittle rock // Deep Rock Behaviour in Engineering Environments. 2020, vol. 2020, pp. 1–12. DOI: 10.1155/2020/8891248.

15. *Zhi-Ming Ye, Huan-Ran Yu, Wen-Juan Yao* A new elasticity and finite element formulation for different Young's modulus when tension and compression loadings // Journal of Shanghai University. 2001, vol. 5, pp. 89 – 92.

16. *Cai M.* Practical estimates of tensile strength and the Hoek-Brown strength parameter m_i of brittle rocks // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2010, vol. 43, pp. 167–184. DOI: 10.1007/s00603-009-0053-1.

17. *Graue R., Siegesmund S., Middendorf B.* Quality assessment of replacement stones for the Cologne Cathedral: mineralogical and petrophysical requirements // Environmental Earth Sciences. 2011, vol. 63, pp. 1799–1822. DOI: 10.1007/s12665-011-1077-x.

18. *Coviello A., Lagioia R., Nova R.* On the measurement of the tensile strength of soft rocks // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2005, vol. 38, pp. 251–273. DOI: 10.1007/s00603-005-0054-7.

19. *Hoek E., Brown E. T.* Practical estimates of rock mass strength // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 1997, vol. 34, pp. 1165–1186. DOI: 10.1016/S1365-1609(97)80069-X. ГИАБ

REFERENCES

1. Guzev M. A., Odintsev V. N., Makarov V. V. Principals of geomechanics of highly stressed rock and rock massifs. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2018, vol. 81, pp. 506 – 511.

2. Joughin W. C. Dealing with uncertainty and risk in the design of deep and high stress mining excavations. *Proceedings of the Eighth International Conference on Deep and High Stress Mining, Australian Centre for Geomechanics*, Perth. 2017, pp. 489 – 507. DOI: 10.36487/ACG_rep/1704_33.3_Joughin.

3. Wagner H. Deep mining: a rock engineering challenge. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2019, vol. 52, pp. 1417–1446. DOI: 10.1007/s00603-019-01799-4.

4. Eberhardt E., Stead D., Stimpson B., Read R. S. Identifying crack initiation and propagation thresholds in brittle rock. *Canadian Geotechnical Journal*. 1988, vol. 35, no. 2, pp. 222 – 233. DOI: 10.1139/cgj-35-2-222.

5. Barton N., Shen B. Risk of shear failure and extensional failure around over-stressed excavations in brittle rock. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2017, vol. 9, no. 2, pp. 210 – 225. DOI: 10.1016/j.jrmge.2016.11.004.

6. Kuijpers J. Fracturing around highly stressed excavations in brittle rock. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*. 2000, vol. 100, pp. 325–332.

7. Lushnikov V. N., Sandy M. P., Eremenko V. A., Kovalenko A. A., Ivanov I. A. Method of definition of the zone of rock massif failure range around mine workings and chambers by numerical modeling. *Gornyi Zhurnal*. 2013, no. 12, pp. 11–16. [In Russ].

8. Eremenko V.A., Aksenov Z.V., Pul E.K., Zakharov N.E. MAP 3D analysis of secondary stress field structure in face area of development headings in rockburst-hazardous seams. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 5, pp. 91 – 104. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-91-104.

9. Eremenko V. A., Ainbinder I. I., Marysyuk V. P., Nagovitsin Yu.N. Guidelines for selecting ground support system for the Talnakh operations based on the rock mass quality assessment. *Gornyi Zhurnal*. 2018, no. 12, pp. 101 – 106. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2018.10.18.

10. Stacey T. R. A simple extension strain criterion for fracture of brittle rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 1981, vol. 18, pp. 469–474. [In Russ]. DOI: 10.1016/0148-9062(81)90511-8.

11. Galchenko Yu. P., Leizer V. I., Vysotin N. G., Yakusheva E. D. Procedure justification for laboratory research of secondary stress field in creation and application of convergent technology for underground mining of rock salt. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 11, pp. 35–47. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-0-35-47.

12. Nguyen Van Min, Eremenko V. A., Leizer V. I., Sukhorukova M. A., Shermatova S. S. Determining the size of zones of tensile deformations in the host array of preparatory workings. *Inzhenernaya fizika*. 2020, no. 7, pp. 39–48. [In Russ]. DOI: 10.25791/infizik.07.2020.1148.

13. Hallbauer D. K., Wagner H., Cook N. G. W. Some observations concerning the microscopic and mechanical behaviour of quartzite specimens in stiff, triaxial compression tests. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1973, vol. 10, pp. 713–726. DOI: 10.1016/0148-9062(73)90015-6.

14. Aizhong Lu, Ning Zhang, Guisen Zeng An extension failure criterion for brittle rock. *Deep Rock Behaviour in Engineering Environments*. 2020, vol. 2020, pp. 1–12. DOI: 10.1155/2020/8891248.

15. Zhi-Ming Ye, Huan-Ran Yu, Wen-Juan Yao A new elasticity and finite element formulation for different Young's modulus when tension and compression loadings. *Journal of Shanghai University*. 2001, vol. 5, pp. 89 — 92.

16. Cai M. Practical estimates of tensile strength and the Hoek-Brown strength parameter mi of brittle rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2010, vol. 43, pp. 167–184. DOI: 10.1007/s00603-009-0053-1.

17. Graue R., Siegesmund S., Middendorf B. Quality assessment of replacement stones for the Cologne Cathedral: mineralogical and petrophysical requirements. *Environmental Earth Sciences*. 2011, vol. 63, pp. 1799–1822. DOI: 10.1007/s12665-011-1077-x.

18. Coviello A., Lagioia R., Nova R. On the measurement of the tensile strength of soft rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2005, vol. 38, pp. 251–273. DOI: 10.1007/s00603-005-0054-7.

19. Hoek E., Brown E. T. Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 1997, vol. 34, pp. 1165–1186. DOI: 10.1016/S1365-1609(97)80069-X.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Нгуен Ван Минь — аспирант, e-mail: minhnv@utt.edu.vn, ГИ НИТУ «МИСиС»,
Умаров Абдулжалил Рамисович[1] — лаборант, e-mail: flek1231998@mail.ru,
Янбеков Амир Маратович[1] лаборант, e-mail: yanbekov17@mail.ru,
Хажыылай Чодураа Владимировна[1] — лаборант, e-mail:hod.872198@mail.ru,
[1] НИЦ «Прикладная геомеханика и конвергентные горные технологии»
ГИ НИТУ «МИСиС».
Для контактов: Нгуен Ван Минь, e-mail: minhnv@utt.edu.vn,
Умаров А.Р., e-mail: flek1231998@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nguyen Van Minh, Graduate Student, e-mail: minhnv@utt.edu.vn, Mining Institute,
National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia
A.R. Umarov [1], Laboratory Assistant, e-mail: flek1231998@mail.ru,
A.M. Yanbekov [1], Laboratory Assistant, e-mail: yanbekov17@mail.ru,
C.V. Khazhyylai [1], Laboratory Assistant, e-mail:hod.872198@mail.ru,
[1] Research Center for Applied Geomechanics and Convergent Technologies in Mining,
Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS»,
119049, Moscow, Russia.
Corresponding authors: Nguyen Van Minh, e-mail: minhnv@utt.edu.vn,
A.R. Umarov, e-mail: flek1231998@mail.ru

Получена редакцией 12.02.2021; получена после рецензии 16.03.2021; принята к печати 10.05.2021.
Received by the editors 12.02.2021; received after the review 16.03.2021; accepted for printing 10.05.2021.