

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТРЕЩИНОВАТОГО ПОРОДНОГО МАССИВА ВОКРУГ ИСКУССТВЕННОЙ ПОЛОСТИ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ СОСТОЯНИЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОСЛАБЛЕНИЯ

*Д.В. Бабец, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», Украина*

*В.В. Бабец, Украинский Государственный химико-технологический университет, Украина*

Построена математическая модель, учитывающая влияние параметров трещиноватости вмещающих пород на напряженно-деформированное состояние породного массива вокруг протяженной горной выработки. Выполнено многовариантное численное моделирование с использованием критерия прочности Хока-Брауна и получена обобщающая зависимость величины относительных перемещений контура выработки от расстояния между трещинами и показателя качества поверхности трещин.

Особую актуальность в связи с глобализацией горного дела и внедрения в практику отечественного подземного строительства передовых зарубежных технологий как проведения, так и крепления выработок, приобретает адаптация международных рейтинговых систем оценки состояния и структуры породного массива к проектированию горных выработок в условиях Украинских угольных месторождений.

На сегодняшний день основными параметрами, по которым классифицируются горные породы, являются: прочностные и деформационные характеристики породного массива (пределы прочности на одноосное сжатие и растяжение, модуль упругости, коэффициент Пуассона); параметры системы потери сплошности (трещин) – ориентация и состояние (отверстия, шероховатости поверхности, наполнение и выветривание); параметры обводненности; исходное поле напряжений (для глубоких выработок); геологическая структура (складки и разломы). Влияние большинства из перечисленных факторов на компоненты напряженно-деформированного состояния породного массива, вмещающего горные выработки хорошо изучены, однако, учет параметров системы потери сплошности, а именно состояние их поверхностей представляет значительный интерес. В первую очередь это связано с тем, что для шахт Западного Донбасса в зонах влияния тектонических нарушений угольные пласты и вмещающие их породы имеют повышенную трещиноватость.

**Целью данной работы** является установление закономерностей влияния особенностей трещиноватости и блочности вмещающего массива на перемещения контура протяженной горной выработки.

## **Известные подходы к описанию неоднородности породного массива.**

Традиционно при решении задач геомеханики особенности трещиноватости и блочности породного массива учитываются путем введения поправочных коэффициентов, уменьшающих расчетную прочность вмещающих пород. Наиболее известным из них является коэффициент структурного ослабления  $K_c$ , который регламентирован нормативными документами, а также определяется на основе статистической теории прочности по методикам, описанным в работах [1,2]. В то же время зарубежные классификации горных пород, начиная со второй половины 20-го века, склоняются к введению результирующих рейтинговых показателей для оценки неоднородности породного массива.

Наиболее системно рейтинговые показатели использованы Хоком и Брауном [3] для применения эмпирической теории прочности в геомеханических расчетах. Ими предложен критерий прочности пород в сложном напряженном состоянии:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_c \left( m \frac{\sigma'_3}{\sigma_c} + s \right)^\alpha \quad (1)$$

где  $\sigma'_1, \sigma'_3$  - главные напряжения;  $m$  и  $s$  – материальные константы;  $\sigma_c$  – предел прочности на одноосное сжатие породного образца.

Хок в работе [4] предложил метод получения оценок прочности массива горных пород, основанный на оценке блочности массива и состояния поверхностей нарушений (трещин). Развитие этого метода привело к созданию классификации, основой которой является так называемый геологический индекс прочности (*Geological Strength Index - GSI*). Основная роль этого индекса заключается в том, что с его помощью появляется возможность определения параметров обобщенного критерия прочности Хока-Брауна.

$$m = m_i e^{\frac{GSI-100}{28-14D}},$$

$$s = e^{\frac{GSI-100}{9-3D}},$$

$$\alpha = 0.5 + \frac{1}{6} (e^{-GSI/15} - e^{-20/3}),$$

где  $D$  – фактор нарушенности породного массива, определяемый в зависимости от условий проходки (для подземных выработок) и состояния поверхности пород (для откосов).

Из критериального соотношения (1) подставив  $\sigma'_3 = 0$  можно получить расчетное значение предела прочности на одноосное сжатие с учетом естественной нарушенности пород:

$$R_{с\ массива} = \sigma_c s^\alpha. \quad (2)$$

Классификация на основе индекса GSI на сегодняшний день является наиболее используемой международной системой описания горных пород.

Нетрудно заметить, что множитель  $s^\alpha$  в (2) выполняет ту же функцию, что и коэффициент структурного ослабления – снижает расчетную прочность породного массива в зависимости от степени и характера его неоднородности. Поэтому, в дальнейшем, будем использовать обозначение  $K_{GSI} = s^\alpha$ . В работе [2] проведен сравнительный анализ применения коэффициента структурного ослабления, определяемого на основе статистической теории прочности, с учетом изменчивости расстояния между трещинами и коэффициента  $K_{GSI}$ . Показаны значительные различия значений, рассматриваемых коэффициентов, при описании сильно трещиноватых, блочных массивов горных пород (рис 1).

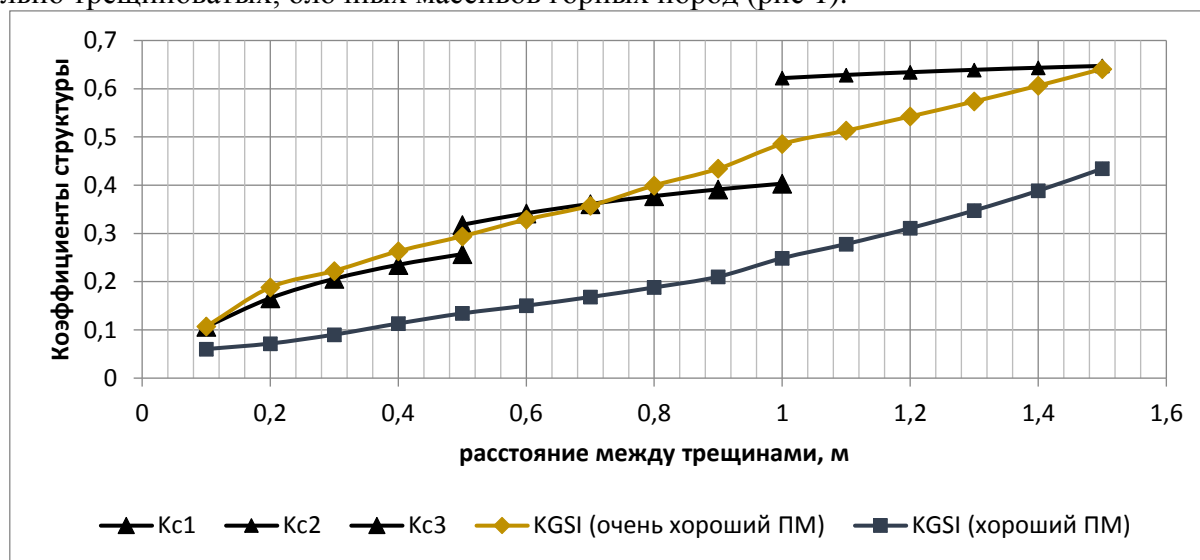


Рис. 1. Значения коэффициентов, уменьшающих расчетную прочность породного массива, в зависимости от расстояния между трещинами:  $K_{c1}$ ,  $K_{c2}$ ,  $K_{c3}$  – коэффициенты структурного ослабления при  $l_t < 0,5$  м;  $0,5 < l_t < 1,0$  м и  $l_t > 1,0$  м соответственно;  $K_{GSI}$  (очень хороший ПМ) и  $K_{GSI}$  (хороший ПМ) – коэффициенты, полученные на основе системы GSI для «очень хорошего» и «хорошего» состояния породного массива

Проведенный анализ показал, что использование коэффициента структурного ослабления, построенного на основе статистической теории прочности, дает более «оптимистичные» значения расчетной прочности сильно трещиноватых, неоднородных горных пород по сравнению с аналогом Хока-Брауна  $K_{GSI}$ . Вызвано это тем, что при определении коэффициента структурного ослабления не учитывается качество поверхностей потери сплошности и тип заполнителя между ними.

В связи с этим, возникла необходимость оценить влияние параметров трещиноватости, с учетом качества поверхностей и типа заполнителя между блоками, на компоненты напряженно-деформированного состояния породного массива. Как известно, наиболее важными характеристиками напряженно-деформированного состояния, т.е. по сути, показателями устойчивости выработки, являются смещения породного обнажения и размер зоны неупругих деформаций. Современное развитие вычислительных средств открывает широкие возможности для сочетания численных методов определения напряженно-деформированного состояния пород, приемов имитационного моделирования и вероятностно-статистического прогноза для построения адекватных математических моделей. При этом, анализ отечественных классификаций горных пород, проведенный в работе [5] показывает, что относительно учета параметров трещиноватости они являются слишком общими и скорее описательными. Это затрудняет их использование при математическом моделировании геомеханических ситуаций.

В тоже время, как указывалось выше, мировые классификации горных пород вводят результирующие рейтинговые показатели в качестве выходного значения различных систематизаций. Так в рейтинговой классификации устойчивости массива горных пород, разработанной Бенявским [6] (RMR), значительное внимание уделено описанию и рейтингованию систем потери сплошности (трещин). Расстояние между трещинами, состояние поверхности трещин, ориентация простирания трещин учитываются в виде рейтинга, т.е. получают количественное описание. Отдельно определяется индекс качества поверхности трещин ( $J_c$ ), как сумма рейтинговых значений (табл. 1 и 2).

Табл.1 Рейтинг качества поверхности трещин

Состояние трещин	Очень шероховатые поверхности не продолжительные без разделения вмещающих пород неподвергающихся действию атмосферных явлений	Слегка шероховатые поверхности Отделение пород менее 1 мм Слегка выветренные	Слегка шероховатые поверхности и Отделение пород менее 1 мм Сильно выветренные	Гладко полированные поверхности Отделение пород 1-5 мм Продолжительные трещины	Мягкая кромка толщиной более 5 мм или Отделение пород более 5 мм Продолжительные трещины
Рейтинг	30	25	20	10	0

Рассмотрим возможность учета индекса качества поверхности трещин ( $J_c$ ) при численном моделировании напряженно-деформированного состояния пород вокруг выработки. Это дает возможность оценить влияние особенностей трещиноватости вмещающих пород и установить закономерности изменения перемещений контура выработки в трещиноватых породах.

Табл. 2 К составлению рейтинга трещиноватости

Длина разрыва	менее 1 м	от 1 до 3 м	от 3 до 10 м	от 10 до 20 м	Более 20 м
рейтинг	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
Отделение пород	Отсутствует	Менее 0,1 мм	От 0,1 до 1 мм	От 1 до 5 мм	Более 5 мм
рейтинг	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>0</b>

Шероховатость	Очень шероховатые поверхности	шероховатые поверхности 5	Слегка шероховатые поверхности	Гладкие поверхности	Гладкие полированные поверхности
<b>рейтинг</b>	<b>6</b>		<b>3</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
Наполнение	Отсутствует	жесткое наполнение менее 5 мм	жесткое наполнение более 5 мм	Мягкое наполнение менее 5 мм	Мягкое наполнение более 5 мм
<b>рейтинг</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>0</b>
Выветривание	Не выветренные	Слегка выветренные	умеренно выветренные	Сильно выветренные	Декомпозированные
<b>рейтинг</b>	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>0</b>

### Оценка состояния породного массива вокруг протяженной горной выработки с учетом качества поверхности трещин.

Оценим влияние качества поверхности трещин на параметры напряженно-деформированного состояния породного массива вокруг протяженной горной выработки путем многовариантного численного моделирования типичной для шахт Западного Донбасса геомеханической ситуации. Исследования выполняются методом конечных элементов в упругопластической постановке с использованием обобщенного критерия Хока-Брауна. Используется хорошо апробированная при решении задач геомеханики лицензионная программная среда RS 2, разработанная лабораторией Rocscience (Канада).

Моделируются усредненные условия проведения выработок, характерные для угольных шахт Западного Донбасса. В расчетах отношение начального поля напряжений  $\gamma H$  к пределу прочности вмещающих пород  $R_c$  варьировалось в интервале 0,5 – 0,7 исходя из условий перехода пород в неупругое состояние на контуре выработки. При этом для каждого соотношения  $\gamma H/R_c$  варьировались значения рейтинга качества поверхности трещин и расстояние между трещинами. При моделировании расстояние между трещинами изменялось от 0,1 до 1,2 м, при этом качество поверхности трещин, описываемое рейтинговым значением  $J_c$ , варьировалось в пределах от 0 до 30. Анализировались смещения контура незакрепленной горной выработки при различных соотношениях указанных факторов.

Визуализация полученных результатов многовариантного моделирования приведена на рис. 2.

Показано, что при всех значениях  $\gamma H/R_c$  и величине индекса  $J_c$ , большей 25, величина смещений контура выработки не превышает 0,05 м. С уменьшением рейтинга качества поверхности трещин и расстояния между трещинами перемещения контура увеличиваются экспоненциально.

Для количественного анализа влияния качества поверхностей потери сплошности рассмотрим относительные перемещения контура выработки  $\Delta U$ , определяемые как разность максимальных перемещений  $U_0$ , вычисленных для массива, не содержащего трещин и перемещений  $U_{max}$ , вычисленных при различных соотношениях расстояния между трещинами и качества поверхности трещин:

$$\Delta U = U_{max} - U_0 ;$$

Результаты многовариантного моделирования приведены в таблице 3.

Для получения математического описания функции  $\Delta U$  используем метод полного факторного эксперимента. Независимые переменные величины, влияющие на функцию отклика, принято называть факторами. Так, факторами в описываемом случае, будут расстояние между трещинами ( $l_t$ ) и рейтинг качества поверхности трещин ( $J_c$ ). На основе регрессионного анализа при проведении полного факторного вычислительного эксперимента на 3-х уровнях получено математическое описание функции отклика ( $\Delta U$ ):

$$\Delta U = \exp(-0,88 - 1,72l_t - 0,077J_c)$$

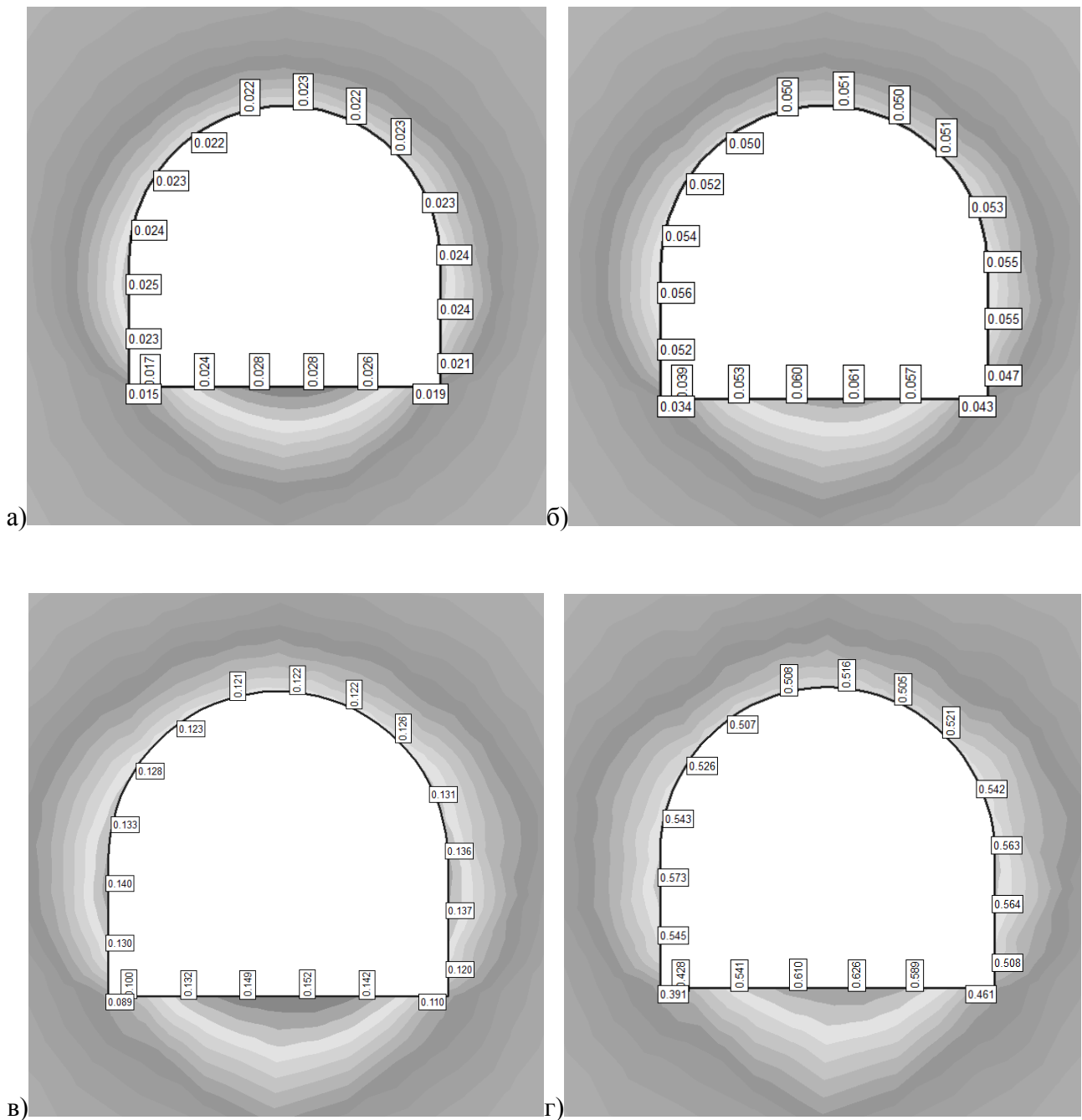


Рис. 2. Визуализация характерных смещений контура выработки при вариации рейтинга качества поверхности трещин: а)  $J_c=25$ ; б)  $J_c=18$ ; в)  $J_c=11$ ; г)  $J_c=4$

Табл. 3. Относительные перемещения контура выработки

$\Delta U$   $J_c$	30	28	26	24	22	20	...	6	4
lt, м									
1,2	0,0112	0,0115	0,0118	0,0121	0,0124	0,0127	...	0,0137	0,0139
1,1	0,013	0,0135	0,014	0,0145	0,015	0,0155	...	0,0151	0,0154
1	0,0135	0,0138	0,0141	0,0145	0,0149	0,0153	...	0,0195	0,02
0,9	0,014	0,0141	0,0142	0,0143	0,015	0,0154	...	0,08	0,1
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
0,4	0,0155	0,0165	0,018	0,0195	0,025	0,027	...	0,14	0,25
0,3	0,016	0,017	0,0195	0,02	0,027	0,0275	...	0,15	0,27
0,2	0,017	0,019	0,02	0,027	0,032	0,04	...	0,3	0,4
0,1	0,02	0,025	0,03	0,04	0,05	0,06	...	0,6	0,7

Для удобства рассмотрения поверхность отклика изображена графически в координатах  $l_t$  (расстояние между трещинами),  $J_c$  (рейтинг качества поверхности трещин). Максимальные перемещения контура выработки являются значениями функции отклика (рис. 3).

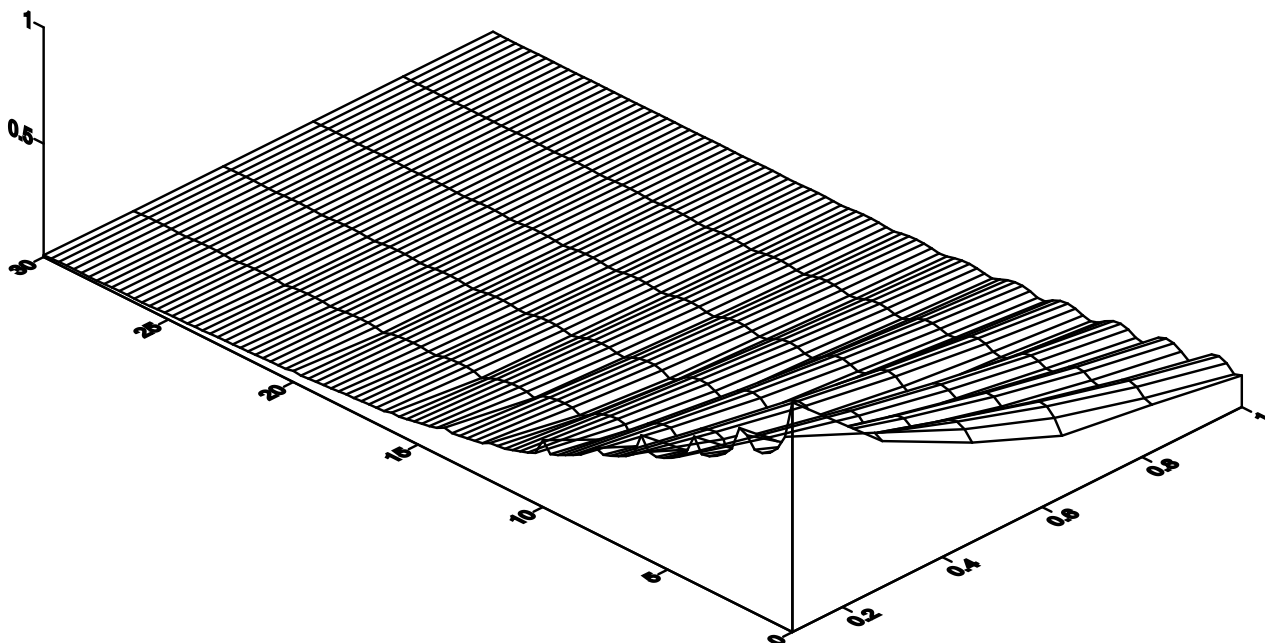


Рис. 3. Поверхность отклика функции  $\Delta U(l_t, J_c)$

Полученная зависимость позволяет уточнить те геомеханические расчеты, которые выполнены без учета качества поверхностей трещин, а также внести уточнения в методику определения коэффициента структурного ослабления.

#### Выводы:

1. С привлечением апробированных численных методов механики горных пород, а также современных теорий прочности, построена математическая модель, учитывающая влияние параметров трещиноватости вмещающих пород на напряженно-деформированное состояние породного массива вокруг протяженной горной выработки.
2. На основе многовариантного моделирования и применения методов многомерного регрессионного анализа получена обобщающая зависимость величины относительных перемещений контура выработки от расстояния между трещинами и рейтинга качества поверхности трещин.

#### Список литературы

1. Шашенко О.М. (2008) Деформационные модели в геомеханике / Шашенко О.М., Сдвижкова О.О., Гапеев С.М. –Днепропетровск: НГУ – 223 с.
2. Babets, D.V., Sdvyzhkova, O.O., Larionov, M.H., Tereshchuk, R.M. (2017) Estimation of rock mass stability based on probability approach and rating systems. Scientific bulletin of National Mining University, No 2: 58-64.
3. Hoek, E. and Brown, E.T. (1980) Underground Excavations in Rock. Institution of Mining and Metallurgy, London, 527 p.
4. Hoek, E. (2002), *Practical Rock Engineering*, Institution of Mining and Metallurgy, London: 325 p.
5. Бабец, Д.В. (2016) Развитие классификации горных пород по степени устойчивости с учетом их естественной нарушенности // Вісник Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2016. – Випуск 2(97) ч.1 – С. 44-51.
6. Bieniawski, Z.T. (1989), *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*: New York, Wiley, 251 p.