Оценка прочности массива горных пород при разработке месторождений открытым способом

А.А.ПАВЛОВИЧ, В.А.КОРШУНОВ[✉], А.А.БАЖУКОВ, Н.Я.МЕЛЬНИКОВ

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Представлены результаты экспериментальных исследований прочностных свойств горных пород применительно к оценке устойчивости бортов карьеров. Получены формулы, описывающие взаимную связь между показателями предельной и остаточной прочности образцов горных пород и остаточной прочности при сдвиге вдоль поверхностей ослабления. Разработан новый расчетный метод определения показателей остаточной прочности горных пород при сдвиге вдоль поверхностей контактов по данным испытаний малогабаритных монолитных образцов встречно направленными сферическими инденторами. Предложена методика оценки расчетных показателей прочности (коэффициентов структурного ослабления и углов внутреннего трения) трещиноватого прибортового массива. Методика основана на данных испытаний на раскалывание малогабаритных монолитных образцов сферическими инденторами с учетом контактных условий вдоль поверхностей ослабления и доступна к применению в полевых условиях. Допускается использовать при испытаниях образцы неправильной формы.

Ключевые слова: устойчивость бортов карьеров; прибортовой массив; геомеханическая модель; коэффициент структурного ослабления; лабораторные испытания; паспорт прочности горных пород; остаточная прочность; контактные условия

Благодарность. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-77-10101).

Как цитировать эту статью: Оценка прочности массива горных пород при разработке месторождений открытым способом / А.А.Павлович, В.А.Коршунов, А.А.Бажуков, Н.Я.Мельников // Записки Горного института. 2019. Т. 239. С. 502-509. DOI 10.31897/PMI.2019.5.502

Введение. При выполнении расчетов устойчивости бортов карьеров в качестве исходных данных используются физико-механические свойства массива горных пород [12, 13]. Однако их определение в натурных условиях связано со значительными трудозатратами и сложностью интерпретации результатов для высоких откосов. В связи с этим исходные данные определяются путем внесения поправок в результаты лабораторных испытаний образцов горных пород на основании использования эмпирических зависимостей, учитывающих особенности структурно нарушенного массива. В российской практике с этой целью введено понятие «коэффициент структурного ослабления» [2, 3, 5], а в зарубежной – используются рейтинговые показатели [10]. Серьезное внимание уделяется характеристикам контактов между трещинами, в частности неровностям поверхности трещин с учетом их протяженности [6-8].

В то же время по мере развития вычислительной техники и специализированного программного обеспечения для оценки устойчивости откосов в практику выполнения расчетов весьма интенсивно внедряются методы, позволяющие более полно и детально учитывать структурное строение прибортового массива.

Одновременное применение эмпирических зависимостей, учитывающих масштабный эффект и моделирование бортов с детальным структурным строением, может привести к двойному учету нарушенности прибортового массива. С другой стороны, все большее распространение получает подход по оценке масштабного эффекта с использованием численного моделирования [4, 15, 16].

В связи с этим весьма перспективным является применение иерархично-блочных моделей скальных массивов, основанных на раздельном учете сдвиговой прочности по контактам породных блоков и прочности самих блоков. В качестве нижних пределов прочности трещиноватого массива допустимо рассматривать значения показателей остаточной прочности горных пород [14].

В настоящее время определение полной характеристики прочности горной породы (паспортов предельной и остаточной прочности горной породы и контактов вдоль поверхностей ослабления) связано с проведением многочисленных экспериментов в сложных нагрузочных устройствах повышенной жесткости или сдвиговых комплексах и нередко ограничивается силовыми возможно-

стями испытательных машин либо отсутствием достаточного количества образцов. В связи с этим актуальной является разработка методов оценки прочности породного массива доступным, в том числе и в полевых условиях, упрощенным способом. В статье основное внимание уделено расчетным методам построения паспортов прочности горных пород по результатам раскалывания образцов сферическими инденторами, позволяющими не только упростить испытания, но и значительно повысить их информативность.

Расчетный метод построения паспорта прочности горных пород. В качестве базового метода испытаний для оценки прочности породного массива принят усовершенствованный метод нагружения образца сферическими инденторами, разработанный в Санкт-Петербургском горном университете [1].

Сущность метода заключается в испытании образца осевым усилием двух стальных шариков до раскалывания, фиксации разрушающей силы P и измерения в расколоте образце площади поверхности отрыва S и площади поверхностей зон разрушенной породы на контакте с инденторами F_1 и F_2 , из которых выбирают большую – F (рис.1). В соответствии с известными экспериментальными данными принята схема процесса разрушения образца, описывающая механическое поведение горной породы в условиях неоднородного сложного напряженного состояния. На момент раскола в образце реализуются три различных механизма разрушения: «квазипластическое» поведение вблизи инденторов и механизмы разрушения путем отрыва и среза на границах зон.

Базовый метод построения паспорта прочности горной породы предусматривает вычисление координат характерных точек огибающей кругов Мора и параметров паспорта прочности расчетным путем с использованием функциональных характеристик, определяющих разрушение породы. В качестве таковых приняты растягивающая σ_t и сжимающая p составляющие предельного сопротивления срезу C_0 при отсутствии нормального напряжения.

В системе координат Мора предлагается аппроксимировать огибающую предельных кругов напряжений прямолинейными отрезками, соответствующими устойчивым видам разрушения – отрыву, срезу, «квазипластическому» поведению в условиях высокого всестороннего неравномерного сжатия, и переходными криволинейными участками, для которых вид разрушения носит вероятностный характер (рис.2, линия 1).

Рис.1. Схема нагружения образца сферическими инденторами

Рис.2. Построение паспортов предельной (1) и остаточной (2) прочности горной породы и паспорта остаточной (3) прочности естественного контакта в образце

Прямолинейный участок огибающей предельных кругов Мора, соответствующий разрушению срезом, характеризуется условным сцеплением C и углом внутреннего трения φ .

Метод позволяет вычислять все параметры прочности – от прочности при всестороннем растяжении σ_{3T} до максимального сопротивления срезу $\tau_{\max}$.

Расчетный метод построения паспорта остаточной прочности горных пород. По результатам сопоставительных испытаний ряда горных пород на раскалывание инденторами и на объемное сжатие по схеме Кармана в режиме регулируемой деформации, для развития базового метода был разработан расчетный метод построения паспорта остаточной прочности по данным испытаний монолитных образцов сферическими инденторами [11].

Построение паспорта остаточной прочности в системе координат Мора также производится путем аппроксимации огибающей предельных кругов напряжений прямолинейными отрезками, соответствующими устойчивым видам разрушения, и переходными криволинейными участками, для которых вид разрушения носит вероятностный характер (рис.2, линия 2). Участок огибающей остаточной прочности, характеризующий разрушение сдвигом, аппроксимирует прямолинейный отрезок, касательный к кругам Мора, соответствующим остаточной величине прочности чистого сдвига при уровне напряжений $\{-\sigma_i; \sigma_i\}$ и максимальному напряжению $\{\sigma_3^M; \sigma_1^M\}$, соответствующему равенству предельной и остаточной прочности при максимальном сопротивлении срезу $\tau_{\max}$. При этом в качестве предела остаточной прочности при одноосном сжатии принимается величина σ_R , численно равная абсолютной величине среднего растягивающего напряжения σ_i при раскалывании образца инденторами [9].

Расчетный метод определения показателей остаточной прочности горных пород при сдвиге вдоль поверхностей ослабления. В Санкт-Петербургском горном университете выполнен комплекс испытаний по определению предельной и остаточной прочности скальных пород при объемном сжатии образцов, срезе со сжатием вдоль поверхностей ослабления и расчетным способом по результатам испытаний образцов сферическими инденторами. Испытания на объемное сжатие и сдвиг были подвергнуты образцы с естественными и искусственными (изготовленными путем распила) поверхностями ослабления.

Затем экспериментальные данные на срез со сжатием вдоль поверхности ослабления (естественной и поверхностей распила) были нанесены на диаграмму Мора и сопоставлены с огибающими кругов предельных и остаточных напряжений, построенными по данным испытаний образцов сферическими инденторами.

В статье в качестве типичного примера представлены результаты испытаний на объемное сжатие в режиме регулируемой деформации в стабилometре БВ-21 и на раскалывание сферическими инденторами пробы мрамора. Объемному сжатию были подвергнуты как монолитные образцы, так и образцы, распиленные под заданными углами к оси, равными 45 и 60° (построение паспортов прочности с учетом ориентации поверхностей ослабления по данным объемных испытаний было выполнено по методике Г.Н.Кузнецова).

Параметры паспортов предельной и остаточной прочности мрамора, построенных по результатам испытаний сферическими инденторами, представлены в табл.1 и 2.

Установлено, что прочность породы на сдвиг по контактам является наименьшей из сопоставляемых показателей. С ростом предельных напряжений, соответствующих сдвиговому механизму разрушения, разница прочности сплошных контактов от остаточной прочности разрушенной породы возрастает (рис.3).

Результаты сопоставления экспериментальных данных предельной и остаточной прочности монолитной породы, полученных при объемных испытаниях, с расчетными значениями показателей, вычисленными по результатам испытаний образцов сферическими инденторами, свидетельствуют об обоснованности определения параметров предельной и остаточной прочности расчетным методом с применением прямолинейной аппроксимации участка огибающей, соответствующего сдвиговому механизму разрушения.

Для сравнения в широком диапазоне предельных напряжений (до уровня максимального сопротивления срезу $\tau_{\max}$) паспорта предельной и остаточной прочности образцов мрамора, оста-

точной прочности на сдвиг вдоль поверхностей распила и аналогичные паспорта прочности, вычисленные при помощи кусочно-линейной аппроксимации предельной огибающей монолитной породы, представлены графически в системе координат Мора (рис.4).

Таблица 1

Расчетные параметры прочности мрамора

σ_i , МПа	p , МПа	σ_T , МПа	C_0 , МПа	σ_c , МПа	φ_0 , град.	C , МПа	φ , град.	$\tau_{\max}$, МПа	σ_3^M , МПа	σ_1^M , МПа
3,40	97,10	6,56	18,16	115,26	68,8	24,9	43,2	648,8	271,9	1569,4
5,74	103,83	10,88	24,41	128,25	63,5	31,1	38,3	428,3	223,9	1080,5
3,72	77,34	7,10	16,96	94,30	65,3	22,1	39,8	369,6	181,1	920,3
3,28	90,95	6,33	17,27	108,21	68,5	23,6	42,9	588,4	250,4	1427,3
5,36	114,34	10,23	24,75	139,08	65,6	32,4	40,1	561,5	271,8	1394,8
3,03	64,62	5,80	14,00	78,62	65,6	18,3	40,1	316,6	153,4	786,6
4,20	84,28	7,99	18,80	103,09	64,9	24,4	39,4	388,3	193,4	970,1
3,80	86,65	7,27	18,14	104,79	66,4	24,0	40,8	456,7	214,1	1127,5
4,29	95,49	8,20	20,23	115,72	66,1	26,6	40,6	490,6	232,7	1213,8
6,54	129,39	12,45	29,09	158,48	64,7	37,6	39,3	586,8	294,3	1467,9
4,61	86,46	8,75	19,96	106,42	64,0	25,6	38,7	370,5	190,5	931,6
Среднее значение		8,32	20,16	113,8	65,7	26,4	40,3	473,3	225,2	1171,8

Таблица 2

Расчетные параметры остаточной прочности мрамора

σ_i , МПа	p , МПа	Сдвиг вдоль поверхности разрушения образца			Сдвиг вдоль естественной трещины			Сдвиг вдоль плоской поверхности (распила)		
		C_{R2} , МПа	C_{R2}/C	φ_{R2} , град.	C_R , МПа	C_R/C	φ_R , град.	C_{SR} , МПа	C_{SR}/C	φ_{SR} , град.
3,40	97,10	3,39	0,136	44,5	0,50	0,020	35,2	0	0	35,2
5,74	103,83	5,74	0,185	40,4	0,99	0,032	33,3	0	0	33,2
3,72	77,34	3,72	0,168	41,6	0,61	0,028	33,9	0	0	33,8
3,28	90,95	3,28	0,139	44,2	0,49	0,021	35,1	0	0	35,0
5,36	114,34	5,36	0,166	41,9	0,88	0,027	34,0	0	0	33,9
3,03	64,62	3,03	0,166	41,9	0,50	0,027	34,0	0	0	33,9
4,20	84,28	4,20	0,172	41,3	0,70	0,029	33,7	0	0	33,7
3,80	86,65	3,80	0,158	42,5	0,61	0,025	34,3	0	0	34,2
4,29	95,49	4,29	0,161	42,3	0,69	0,026	34,2	0	0	34,1
6,54	129,39	6,54	0,174	41,2	1,10	0,029	33,7	0	0	33,6
4,61	86,46	4,61	0,180	40,7	0,79	0,031	33,4	0	0	33,4
Среднее значение		4,36	0,164	42,0	0,71	0,027	34,1	0	0	34,0

Установлено, что огибающую остаточной прочности плоских однородных контактов (поверхностей распила) в диапазоне напряжений, соответствующих сдвиговому механизму разрушения, допустимо аппроксимировать прямолинейным отрезком, соединяющим на графике в системе координат Мора точки, соответствующие остаточному сопротивлению сдвигу вдоль поверхности структурного ослабления при одноосном сжатии и достижению напряжениями уровня максимального сопротивления срезу $\tau_{\max}$ (рис.4).

Таким образом, результаты выполненных исследований свидетельствуют о том, что подход, использованный ранее при разработке метода построения паспорта остаточной прочности по данным испытаний монолитных образцов сферическими инденторами, применим и для определения показателей остаточной прочности на сдвиг вдоль поверхностей ослабления. На основе этого разработан расчетный метод определения показателей остаточной прочности горных пород при сдвиге вдоль поверхностей ослабления.

Рис.3. Экспериментальные данные для построения паспортов предельной (1) и остаточной (2) прочности образцов и паспорта остаточной (3) прочности по контактам в мраморе

Рис.4. Построение расчетных паспортов остаточной прочности разрушенных образцов (1) и поверхностей ослабления (2) в мраморе

Рис.5. Зависимость предельных и остаточных углов внутреннего трения от хрупкости горной породы

В основе метода лежит аппроксимация в системе координат Мора предельной огибающей остаточной прочности однородных породных контактов прямолинейными отрезками, соответствующими сдвиговому механизму разрушения и достижению напряжениями уровня максимального сопротивления срезам $\tau_{\max}$. Прямолинейный отрезок огибающей остаточной прочности на сдвиг вдоль естественных трещин на диаграмме Мора проходит через граничные точки с координатами $\{\sigma_n; \tau\}$, $\{\sigma_t/2; \sigma_t/2\}$ и $\{\sigma_{\text{ср}}^M; \tau_{\max}\}$, соответствующими максимальному касательному напряжению в разрушенной породе при одноосном сжатии σ_c и состоянии максимального сопротивления срезам $\tau_{\max}$. Аналогичный отрезок огибающей остаточной прочности на сдвиг вдоль плоских поверхностей распила проходит через начало координат (см. рис.2, линия 3).

Предложены формулы для вычисления основных параметров паспортов остаточной прочности горных пород (остаточного сцепления при сдвиге и соответствующих углов внутреннего трения) для различных условий по контактам по данным испытаний образцов сферическими инденторами:

• при сдвиге вдоль естественных трещин в диапазоне главных нормальных напряжений от $\sigma_t/2$ до $(\sigma_{\text{ср}}^M - \tau_{\max} \cos \varphi)$:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi_R &= \frac{\tau_{\max} - \frac{\sigma_t}{2}}{\sigma_{\text{ср}}^M - \frac{\sigma_t}{2}} = \\ &= \frac{K^2 - 3K + 6\sqrt{K} - 2}{K^2 + 2K\sqrt{K} - K - 2\sqrt{K} - 2}; \quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_R &= \frac{\sigma_t}{2} (1 - \operatorname{tg} \varphi_R) = \\ &= \sigma_t \sqrt{K} \frac{K + \sqrt{K} - 4}{K^2 + 2K\sqrt{K} - K - 2\sqrt{K} - 2}; \quad (2) \end{aligned}$$

$$\frac{C_R}{C} = \frac{2\sqrt{K}(K + \sqrt{K} - 4)}{(1 + \sqrt{K})(K^2 + 2K\sqrt{K} - K - 2\sqrt{K} - 2)}; \quad (3)$$

• при сдвиге вдоль плоских поверхностей распила в диапазоне главных нормальных напряжений от 0 до $\sigma_{\text{ср}}^M$:

$$\operatorname{tg} \varphi_{SR} = \frac{\tau_{\max}}{\sigma_{\text{ср}}^M} = \frac{K^2 - 3K + 6\sqrt{K}}{K^2 + 2K\sqrt{K} - K - 2\sqrt{K}}; \quad (4)$$

$$C_{SR} = 0; \quad (5)$$

$$\frac{C_{SR}}{C} = 0. \quad (6)$$

Для расчета формул примем показатель хрупкости $K = p/\sigma_t$.

Методика оценки прочности структурно нарушенного массива. Исследована зависимость показателей структурного ослабления – значений остаточных углов трения по контактам (φ_R и φ_{SR}) и остаточного сцепления (C_R/C) от хрупкости горных пород (коэффициент хрупкости $K_f = \sigma_c/\sigma_T$, где σ_c , σ_T – пределы прочности при одноосном сжатии и растяжении соответственно) и контактных условий.

С ростом хрупкости увеличивается значение остаточных углов внутреннего трения по контактам пород (от 30 до 36° при $K_f = 5-20$). При этом величины φ_R и φ_{SR} имеют весьма близкие значения (рис.5). Следовательно, неровность поверхностей контактов практически не влияет на величину этого параметра паспортов прочности.

Величины остаточных углов трения по контактам φ_R и φ_{SR} несколько меньше соответствующих углов внутреннего трения породы φ для более хрупких пород ($K_f > 7$), в то время как для менее хрупких пород наблюдается обратная тенденция: $\varphi_R > \varphi$. Для большинства реальных горных пород ($K_f = 6-10$) отличие в среднем составляет около 2° и не превышает 6 %.

Минимальные величины остаточного сцепления для естественных контактов C_R/C значительно меньше (примерно в 5-7 раз) величин остаточной прочности породных образцов C_{R2}/C (рис.6).

Реальные трещины в массиве всегда имеют неровности, обусловленные строением слагающих его горных пород. Поэтому при оценке прочности массива в качестве нижних значений показателей прочности предлагается использовать средние арифметические значения прочностных показателей структурного ослабления по неровным естественным и плоским контактам – C_R/C и C_{SR}/C . Для вычисления $K_{\text{стр}}$ по данным испытаний образцов сферическими инденторами предложена следующая формула:

$$K_{\text{стр}} = \frac{C_R}{2C} = \frac{\sqrt[4]{K}(K + \sqrt{K} - 4)}{(1 + \sqrt{K})(K^2 + 2K\sqrt{K} - K - 2\sqrt{K} - 2)}. \quad (7)$$

Рис.6. Зависимость прочностных показателей структурного ослабления от хрупкости горной породы

Рис.7. Зависимость коэффициента структурного ослабления $K_{\text{стр}}$ и угла внутреннего трения массива φ_m от хрупкости горной породы

Учитывая взаимную зависимость величин условного сцепления и углов внутреннего трения, в качестве ориентировочной оценки при расчетах устойчивости бортов карьеров и естественных откосов совместно с величиной $K_{стр}$, определяемой по формуле (7), рекомендовано применять величину остаточного угла трения при сдвиге вдоль естественных трещин φ_R , вычисляемую по формуле (1).

Таким образом, на основании проведенных исследований при отсутствии надежных данных для изотропных бортов карьеров в качестве ориентировочной оценки предлагается определять коэффициент структурного ослабления $K_{стр}$ для сцепления и угол внутреннего трения φ_m трещиноватого прибортового массива в зависимости от хрупкости горной породы (рис.7).

Сведения о показателях прочности массива горных пород, оцениваемые согласно предлагаемой методике без детального учета особенностей поверхностей ослабления, носят предварительный характер, присущий ранней стадии изучения объекта.

Расчетные значения показателей прочности массива горных пород необходимо уточнять по мере накопления данных о фактических параметрах поверхностей ослабления в натурных условиях и проведении дополнительных исследований.

Приведенная методика применима в полевых условиях при помощи технически простого нагрузочного устройства. При испытаниях допускается использовать образцы неправильной формы.

Выводы

1. Приведен расчетный метод определения показателей остаточной прочности горных пород при сдвиге вдоль поверхностей контактов по данным испытаний малогабаритных монолитных образцов встречно направленными сферическими инденторами.

2. Предложена методика оценки расчетных показателей прочности (коэффициентов структурного ослабления для сцепления и углов внутреннего трения) трещиноватого прибортового массива горных пород.

3. Разработаны рекомендации, согласно которым при рассмотрении борта карьера как сплошного изотропного массива для ориентировочной оценки в качестве исходных данных использовать угол внутреннего трения и сцепление (пересчет с использованием коэффициента структурного ослабления) исходя из зависимости, представленной на рис.7, а при рассмотрении борта карьера с учетом иерархично-блочного строения исходные данные следует принимать в диапазоне между прочностными свойствами по контактам горных пород и остаточной прочностью массива (см. рис.5 и 6).

ЛИТЕРАТУРА

1. Коршунов В.А. Расчетный метод построения паспорта прочности горной породы по результатам испытаний образцов сферическими инденторами / В.А.Коршунов, Д.Н.Петров, К.Н.Ястребова // Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий: геомеханическое обеспечение проектирования и сопровождения горных работ: Сборник научных трудов. VIII Международная научно-практическая конференция / Санкт-Петербургский горный университет. СПб, 2017. С. 256-265.
2. Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов строящихся и эксплуатируемых карьеров / ВНИМИ. Л., 1972. 165 с.
3. Правила обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах / ВНИМИ. СПб, 1998. 208 с.
4. Протосеня А.Г. Определение масштабного эффекта прочностных свойств трещиноватого горного массива / А.Г.Протосеня, П.Э.Вербилло // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2016. Вып. 1. С. 167-176.
5. Фисенко Г.Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов. М.: Недра, 1965. 373 с.
6. Barton N. A relationship between joint roughness and joint shear strength // Rock fracture: In Proceedings of International Symposium on Rock Fracture. Nancy. 1971. P. 1-8.
7. Bandis S. Experimental studies on scale effects on the shear behaviour of rock joints / S.Bandis, A.Lumsden, N.Barton // International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics. 1981. P.1-21.
8. Barton N. Shear strength investigations for surface mining // In Stability in Surface Mining: Proceedings of 3rd International Conference. Vancouver, British Columbia. 1982. P. 171-196.
9. Geomechanical substantiation of calculate indentors of the rock mass strength for slopes stability analysis of open pit / A.A.Pavlovich, V.A.Korshunov, S.V.Tsirel, N.Ya.Melnikov, A.A.Bazhukov // Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses: Proceedings of the European Rock Mechanics Symposium (Eurock 2018, Saint-Petersburg, Russia, 22-26 May 2018). London: Taylor and Francis Group. UK. 2018. Vol. 2. P. 1053-1058.

10. *Hoek E.* Hoek – Brown failure criterion / E.Hoek, C.Caranza-Torres, B.Corcum // Proceedings of the North American Rock Mechanics Society: Mining Innovation and Technology. Toronto. 2002. P. 267-273.
11. *Korshunov V.A.* Strength estimation of fractured rock using compression a specimen with spherical indenters / V.A.Korshunov, D.A.Solomoichenko, A.A.Bazhukov // Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses: Proceedings of the European Rock Mechanics Symposium (Eurock 2018, Saint-Petersburg, Russia, 22-26 May 2018). London: Taylor and Francis Group. UK. 2018. Vol. 1. P. 299-305.
12. *Litvinenko V.* Preface. Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses // International European Rock Mechanics Symposium (Eurock 2018, Saint-Petersburg, Russia, 22 May 2018). London: Taylor and Francis Group. UK. 2018. Vol. 1. P. 9-15.
13. *Litvinenko V.* Advancement of geomechanics and geodynamics at the mineral ore mining and underground space development // Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses: Proceedings of the European Rock Mechanics Symposium (Eurock 2018, Saint-Petersburg, Russia, 22 May 2018). London: Taylor and Francis Group. UK. 2018. Vol. 1. P. 3-16.
14. *Muller L.* Rock mass behavior – determination and application in engineering practice // Proceed. 3rd Congr. Int. Soc. Rock Mech. 1974. Vol. 1A. P. 205-215.
15. Numerical determination of strength and deformability of fractured rock mass by FEM modeling / Yang Jian Ping, Chen Wei Zhong, Yang Dian Sen, Yuan Jing Qiang // Computers and Geotechnics. 2015. Vol. 64. P. 20-31.
16. *Schlotfeldt P.* Overhanging rock slope by design: An integrated approach using rock mass strength characterization, large-scale numerical modelling and limit equilibrium methods / P.Schlotfeldt, D.Elmo, B.Panton // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2018. N 10. P. 72-90.

Авторы: **А.А.Павлович**, канд. техн. наук, заведующий лабораторией, APavlovich@spti.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), **В.А.Коршунов**, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, taok@bk.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), **А.А.Бажуков**, аспирант, alex.bazhukov2016@yandex.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), **Н.Я.Мельников**, аспирант, melnikyar@yandex.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Статья поступила в редакцию 07.05.2019.

Статья принята к публикации 11.06.2019.