

УДК 622.011.4

ВЛИЯНИЕ УГЛА ПАДЕНИЯ ТРЕЩИН НА ЛОКАЛЬНОЕ НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИОТКОСНОЙ ЗОНЫ ВСКРЫШНОГО УСТУПА

Марков Сергей Олегович^{1,2},
markovso@kuzstu.ru

Хорешок Алексей Алексеевич¹,
haa.omit@kuzstu.ru

Тюленев Максим Анатольевич¹,
tma.geolog@kuzstu.ru

¹ Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева,
Россия, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28.

² Филиал Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева в г. Междуреченске,
Россия, 652877, г. Междуреченск, пр. Строителей, 36.

Актуальность. Напряженно-деформированное состояние массива горных пород при открытой разработке месторождений полезных ископаемых, равно как и при строительстве в грунтах выемок значительных размеров, зависит как от механических свойств пород, так и от структурно-текстурных особенностей массива горных пород. В частности, наличие трещин в приоткосной зоне уступа может значительно ослабить его устойчивость, а направление и угол падения трещин относительно откоса уступа изменяют расположение напряженных зон внутри массива относительно поверхности обнажения. Актуальной научно-практической задачей представляется выявление зон повышенных механических напряжений с целью прогноза поведения массивов горных пород с различными структурно-текстурными свойствами.

Цель: выявление зон концентрации напряжений в приоткосной части уступа в массиве горных пород с различными структурно-текстурными свойствами при ведении открытых горных работ.

Методы: математическое моделирование массивов горных пород с учётом их физико-механических свойств и структурно-текстурных особенностей методом конечных элементов, обработка результатов экспериментальных исследований.

Результаты. Приведено описание математической модели упругого поведения естественно трещиноватого массива горных пород, имеющего поверхность обнажения в виде уступа, а также закономерности распределения концентрации напряжений в нём. Описано напряженно-деформированное состояние нагруженного и ненагруженного массивов в ненарушенном и нарушенном трещинами различной ориентации состоянии. Описано положение зон концентрации растягивающих напряжений, проведено сравнение их значений для уступов с различным строением. Выявлены повышенные значения растягивающих напряжений в массиве при направлении падения трещин от откоса уступа по сравнению с ненарушенным состоянием и при направлении падения трещин в сторону откоса уступа.

Ключевые слова:

Метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, устойчивость пород, трещиноватость, концентрация напряжений, строение массива.

Введение

Структурно-текстурные особенности массива горных пород оказывают значительное влияние на поведение уступов под нагрузкой от горного оборудования. Распределение напряжений в приоткосной части уступа сильно зависит от параметров трещиноватости пород [1–5]. В статье приводятся результаты численного моделирования распределения в породном уступе зон с повышенным растягивающим напряжением. Появление таких зон может привести к росту трещин с дальнейшей потерей устойчивости пород уступа и его обрушением [6–17].

Поскольку поведение массива горных пород в окрестностях открытых горных выработок является ключевым при оценке безопасности ведения горных работ [18–22], актуальность решения геомеханических задач по прогнозу поведения таких массивов не подвергается сомнению.

В тектоническом плане угленосные отложения Кузбасса характеризуются слоистостью (преимущественно, обусловленной переслаиванием песчаников, алевролитов и аргиллитов с пластами угля) и разви-

тыми системами трещин. Данное обстоятельство связано с тем, что накопление осадков, в том числе и угленосных, происходило в условиях мелководных открытых морей и заболоченных участков суши, а сама угленосная Кузнецкая котловина и её обрамление входят в состав подвижного Урало-Охотского складчатого пояса [23, 24]. Наличие многочисленных систем трещин проявляется как на геологических обнажениях коренных горных пород, выходящих на дневную поверхность из-под неоген-четвертичных отложений, так и в открытых горных выработках, пройденных по коренным породам (рис. 1).

При ведении горных работ на напряженное состояние массива горных пород большое влияние оказывают параметры трещиноватости. Для условий Кузбасса данные параметры лежат в широких пределах: длины трещин от 0,1 до 10...15 м, расстояния между трещинами от 0,5 до 4...5 м; значения углов падения и азимутов простирания лежат во всем возможном диапазоне значений. Данные значения характерны для складчатых зон со сложным тектоническим строением, т. е. для Кузбасса [24].



a/a



b/b

Рис. 1. Трещиноватые коренные породы: а) на поверхности откоса уступа; б) обнажение из-под неоген-четвертичных отложений

Fig. 1. Cracked bedrock: a) on the surface of the ledge slope; b) outcrop from under Neogene-Quaternary sediments

Материалы и методы исследования

В качестве исходных данных для модели были взяты усредненные физико-механические характеристики аргиллита, имеющие следующие значения для условий Кузбасса: предел прочности на одноосное сжатие $R_c=15...25$ МПа, предел прочности на одноосное растяжение $R_p=1,7...2,3$ МПа, модуль Юнга $E=18$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu=0,25$, модуль сдвига $G=7,2$ МПа, плотность $\rho=2,4...2,6$ т/м³ [23, 25]. Массив, сложенный слоями горных пород с различными упругими характеристиками, в данной задаче не рассматривался, хотя применение метода конечных элементов (МКЭ) позволяет решать такие задачи совместно [17–19].

В целом вмещающие горные породы Кузбасса рассматриваются как упругие тела с соответствующим пределом прочности на сжатие и растяжение, а уступы – как трещиноватые массивы горных пород [26–28]. Постановка такой задачи позволит найти области перенапряжений в массиве, где с высокой долей вероятности будет наблюдаться рост трещин с последующим разрушением горной породы и породного уступа.

В качестве примера рассматривался породный уступ высотой $H=29$ м с углом откоса $\alpha=70^\circ$. Решением задачи упругости в постановке плоских деформаций методом конечных элементов были рассчитаны напряженно-деформированные состояния (НДС) массивов:

- 1) без трещин и без внешней нагрузки;
- 2) без трещин и с нагрузкой в виде веса экскаватора ЭШ 10.70, распределенной по верхней площадке уступа начиная с расстояния 3 м от верхней бровки

- [29, 30]. Обе модели рассчитывались с числом узлов сетки 19142 (рис. 2), время расчета – около 1 с;
- 3) без внешней нагрузки с 21 трещиной с раскрытием 0...2 мм, длиной 4 м, расстоянием между трещинами 3,5...4 м и падением трещин вглубь массива (от откоса) под углом 45°;
- 4) аналогично, с нагрузкой в виде веса экскаватора ЭШ 10.70, распределенной по верхней площадке уступа начиная с расстояния 3 м от верхней бровки. Модели 3) и 4) рассчитывались на 118523 узлах сетки, время расчета – около 310 с;
- 5) без внешней нагрузки с 27 трещинами с раскрытием 0...2 мм, длиной 4 м, расстоянием между трещинами 3,5...4 м и падением трещин из массива (к откосу) под углом 45°;
- 6) аналогично, с нагрузкой в виде веса экскаватора ЭШ 10.70, распределенной по верхней площадке уступа начиная с расстояния 3 м от верхней бровки. Модели 5) и 6) рассчитывались на 734888 узлах сетки, время расчета – около 2550 с.

Постановка задачи в плоских деформациях была выбрана потому, что такой подход применяется при исследовании НДС моделей, протяженных в направлении, перпендикулярном плоскости модели, что соответствует исследованию НДС протяженного уступа.

Моделирование НДС производилось методом конечных элементов с помощью программного обеспечения «ELCUT® Профессиональный» 6.3.2.2098 SP2 (© ООО «ТОР», Россия). Для расчета использовалось следующее аппаратное обеспечение: CPU Intel Core i7-9700K (с максимальной частотой до 4,6 ГГц), RAM 32 Гб. Исходя из действующей спецификации применяемого ПО, вычисления производились на 1 либо 2 ядрах CPU с задействованием до 100 % одного ядра либо до 50 % мощности двух ядер соответственно с выбором загрузки в автоматическом режиме. Из-за ограничений применяемого ПО мощности GPU NVIDIA TU117 не использовались, параллельные вычисления CUDA и PhysX не выполнялись.

На рис. 2 приведены граничные условия задачи.

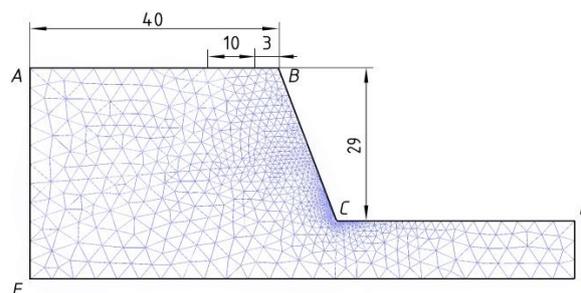


Рис. 2. Начальная модель уступа (без трещин) с сеткой конечных элементов: верхняя площадка шириной 40 м, база экскаватора диаметром 10 м, борта безопасности 3 м, высота уступа 29 м; рёбра AF и DE приняты неподвижными по оси Ox, ребро FE принято неподвижным по оси Oy

Fig. 2. Initial model of ledge (without cracks) with finite element grid: top platform 40 m wide, excavator base diameter 10 m, safety berm 3 m, ledge height 29 m; edges AF and DE are taken fixed along Ox axis, edge FE is taken fixed along Oy axis

Результаты и обсуждение

Исходя из положений теории прочности материалов, горная порода находится в устойчивом состоянии, если действующие в ней растягивающие напряжения не превосходят критерий Мора [16–18]:

$$\sigma_{Mo} > R_p. \quad (1)$$

На рис. 3 приведена графическая интерпретация НДС уступа, не осложненного системами трещин. В

данном случае сжимающие напряжения имеют значения меньше 0, растягивающие напряжения – больше 0. Области развития сжимающих напряжений (при критерии Мора $\sigma_{Mo} < 0$) занимают до 50 % объема массива уступа, не имеющего внешней нагрузки, и до 30 % объема при наличии нагрузки. При этом значения сжимающих и растягивающих напряжений не превышают соответствующих пределов прочности.

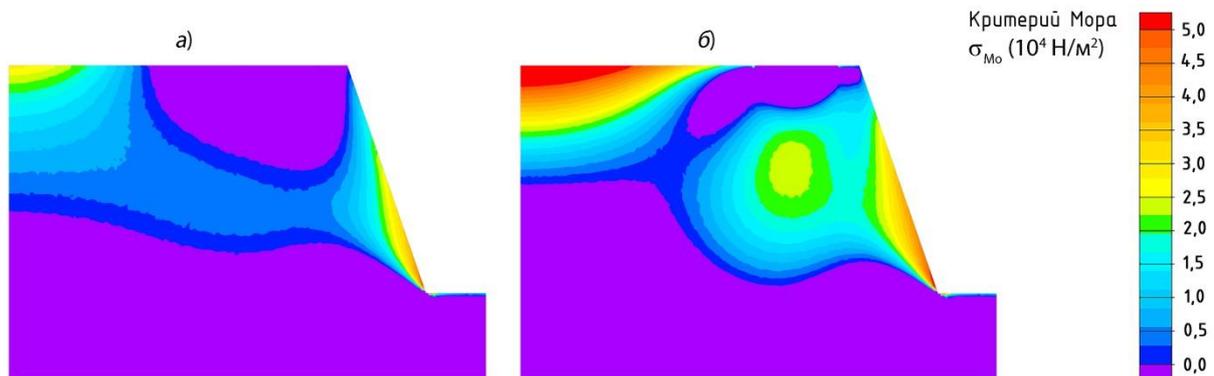


Рис. 3. Модель напряженно-деформированного состояния уступа: а) исходное состояние без нагрузки; б) уступ, нагруженный весом драглайна ЭШ 10.70

Fig. 3. Model of stress-strain state of the ledge: а) initial state without load; б) ledge loaded with the weight of dragline ESh 10.70

Анализ НДС ненарушенного трещинами уступа показывает, что при наличии распределенной нагрузки на верхней площадке уступа в виде веса экскаватора-драглайна, например, ЭШ 10.70 с диаметром базы 10 м, который при движении создает давление на грунт 240 кПа, зона сжимающих напряжений под его базой на глубине порядка 5 м сменяется зоной растягивающих напряжений, распространяющейся практически на всю высоту уступа. Указанные напряжения не превышают, впрочем, предела прочности породы на растяжение.

Выявлено, что область с наибольшими растягивающими напряжениями (порядка 50–60 кПа) находится приблизительно в 1 м над нижней бровкой уступа, распространяясь вглубь массива также приблизительно на 1 м (рис. 3, а). Расположение зоны повышенных растягивающих напряжений на откосе уступа не меняется при размещении на верхней площадке уступа горного оборудования (рис. 3, б); при этом её размеры увеличиваются приблизительно в 2–3 раза по сравнению с размерами аналогичной зоны без дополнительной нагрузки на верхней площадке уступа.

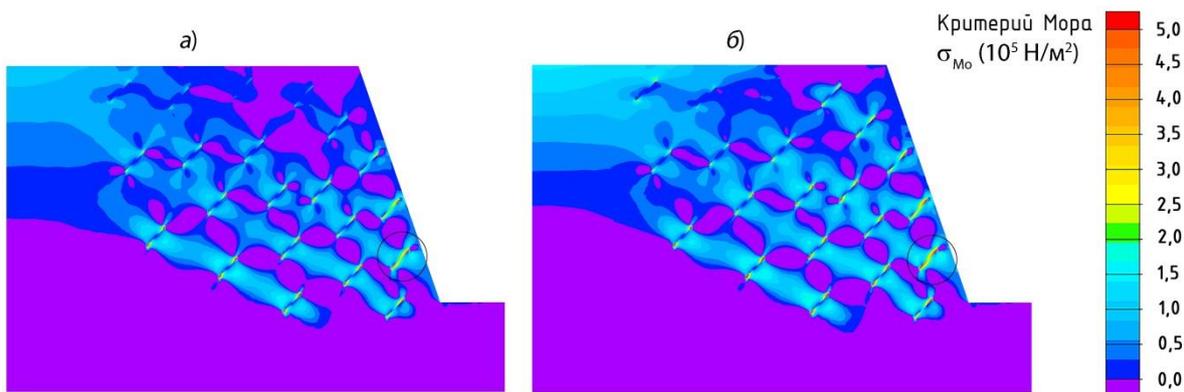


Рис. 4. Модель напряженно-деформированного состояния уступа, сложенного трещиноватыми горными породами с системой трещин, падающих в породный массив: а) состояние без нагрузки; б) уступ, нагруженный весом драглайна ЭШ 10.70

Fig. 4. Model of the stress-strain state of a ledge formed by fractured rocks with a system of cracks falling into the rock massif: а) no-loaded state; б) ledge loaded with the weight of dragline ESh 10.70

В данном исследовании рассматривались расположенные в массиве трещины и их влияние на изменение НДС в массиве горных пород уступа при веде-

нии открытых горных работ. Направление падения трещин в первом случае принималось от откоса (вглубь массива пород); во втором случае – к откосу

(соответственно, рис. 4, б). Рассматривались уступы ненагруженные (рис. 4, а; 6, а) и нагруженные весом драглайна (рис. 4, б; 6, б). Расстояние между трещинами принималось равным 3...4 м, длина трещин 4 м, начальное раскрытие трещин до 2 мм.

Анализ НДС уступа с трещинами, направленными от откоса вглубь массива, показал, что:

- за счет наличия трещин в массиве концентрация действующих напряжений привела к росту значений последних до 12–15 раз;
- по сравнению с ненарушенным массивом горных пород значения растягивающих напряжений на верхней площадке уступа на расстоянии 40 м от верхней бровки выросли приблизительно в 6–7 раз;
- наиболее высокая концентрация растягивающих напряжений наблюдается у верхних углов над верхним берегом и у нижних углов под нижним берегом трещин, при этом напряжения концентрируются не в самом углу, а у поверхности берега трещины;

- углы трещин лежат в области сжимающих напряжений, при этом главное напряжение σ_1 направлено поперёк направления трещины, что предотвращает её раскрытие и рост (рис. 5; данный фрагмент приоткосной части уступа в 5 м над нижней бровкой на рис. 4 обозначен кружком);
- растягивающие напряжения концентрируются в межтрещинных породных «мостиках», расположенных в направлениях, приближенных к нормали к поверхности берегов трещин;
- «мостики» возникают при величине нормальной проекции одной трещины на другую, превышающей половину длины трещины;
- длина породных «мостиков» может превышать в 1,5...2 раза расстояние до соседних трещин, не лежащих в направлении нормали к берегам;
- распространение зоны повышенных растягивающих напряжений ограничивается углами трещин, лежащих на максимальном расстоянии от откоса уступа.

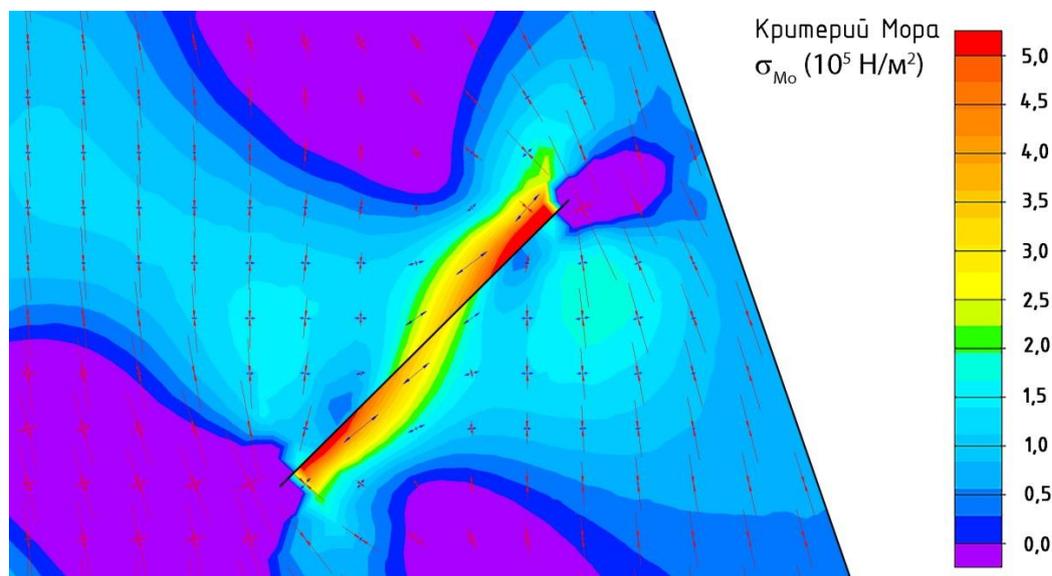


Рис. 5. Направления действия главных напряжений и величина критерия прочности в окрестностях трещин (стрелки, направленные друг к другу, показывают сжимающие напряжения, друг от друга – растягивающие)

Fig. 5. Directions of the main stresses and the value of the strength criterion in the vicinity of the cracks (arrows pointing to each other show compressive stresses, from each other – tensile ones)

При анализе НДС особое внимание уделялось напряжениям, превышающим предел прочности породы на растяжение R_c , поскольку такие напряжения приводят к росту существующих и образованию новых трещин в горных породах. Нарушение условия (1) в краевых частях трещин ведет к их росту, что в свою очередь приводит к возникновению поверхностей ослабления или отслаиванию пород в откосе уступа с уменьшением его несущей способности.

Исходя из полученных данных можно сделать вывод о том, что при наличии взаимно перпендикулярных систем трещин может возникнуть довольно опасная ситуация даже в том случае, если основная система трещин имеет направление падения от откоса (вглубь массива). В этом случае рост и раскрытие дополнительных трещин будет происходить в направ-

лении, перпендикулярном к действию растягивающих напряжений. Начинаться такие трещины будут на берегах уже имеющихся, с потенциальным выходом новых трещин на поверхность откоса. При этом будут возникать дополнительные поверхности ослабления в массиве горных пород.

Этот вывод следует из основ линейной механики разрушения, в которой трещину представляют в виде поверхности разрыва смещений, размеры которой изменяются под действием приложенных к телу внешних нагрузок [31]. Согласно гипотезе Гриффитса, разрушение произойдет, когда при бесконечно малом удлинении трещины будет выделяться больше упругой энергии, чем это требуется для удельной энергии образования новых поверхностей трещины.

Удельная поверхностная энергия тела, или энергозатраты, отнесенные к эффективной площади разрушения (удельная работа образования поверхности разрушения) γ (Дж/м²), связана с предельным напряжением σ (Н/м²), приводящим к разрыву структурных связей в горной породе, и предельной минимальной длиной трещины l_c соотношением:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2\gamma E}{\pi l_c}}$$

для плоского напряженного состояния и соотношением:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2\gamma E}{\pi l_c (1-\nu^2)}}$$

для плоского деформированного состояния. Здесь E – модуль упругости, Па/м²; ν – коэффициент Пуассона.

Рассмотрим уступ, в котором падение трещин направлено в сторону откоса.

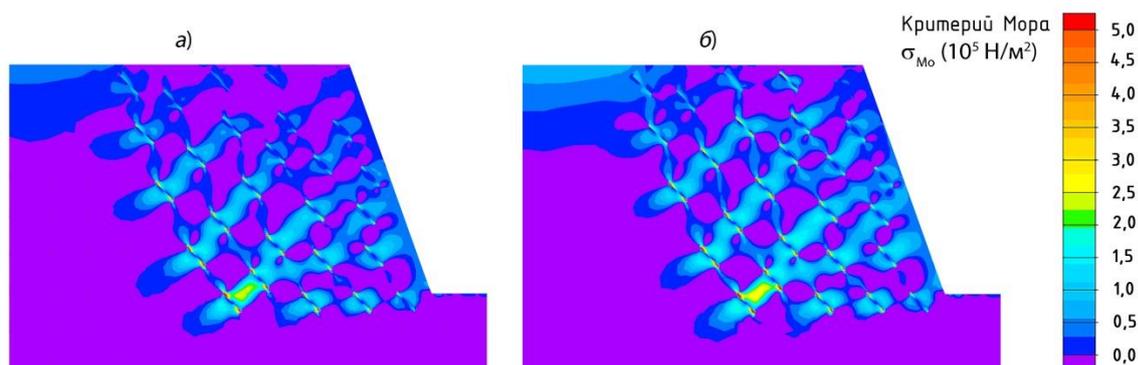


Рис. 6. Модель напряженно-деформированного состояния уступа, сложенного трещиноватыми горными породами с системой трещин, падающих в сторону откоса: а) состояние без нагрузки; б) уступ, нагруженный весом драглайна ЭШ 10.70

Fig. 6. Model of the stress-strain state of a ledge formed by fractured rocks with a system of cracks falling in the direction of the slope: a) condition without load; b) ledge loaded with the weight of draglines ESh 10.70

В приведенном примере растягивающие напряжения также распространяются по породным «мостикам» между трещинами. В отличие от ранее рассмотренного случая, распространение зон растягивающих напряжений не ограничивается трещинами, лежащими на максимальном удалении от откоса, а продолжается от их берегов вглубь породного массива. Одновременно с этим зоны растягивающих напряжений выходят на поверхность откоса, «перекрывая» собой зоны сжимающих напряжений и отодвигая их вглубь массива, что также существенно отличает данную картину НДС от предыдущего случая.

Если сравнивать значения критерия прочности Мора, действующие в области растяжения, в зависимости от расстояний от верхней площадки и от откоса уступа, то наблюдается картина для ненагруженных оборудованием уступов (таблица).

Полученные значения распределения критерия прочности показывают, что при падении трещин к откосу приоткосная часть уступа испытывает большие растягивающие нагрузки, чем при падении трещин вглубь массива (в среднем на 50 %). Однако при падении трещин к откосу весь массив в целом испытывает меньшие растягивающие напряжения, чем при падении трещин вглубь массива (приблизительно от 50 до 250 %). Такая неравномерность НДС массива обусловлена различными механизмами перераспределения напряжений при различных структурно-текстурных характеристиках массива. Одновременно с этим в обоих случаях значения растягивающих напряжений превышают их значения в десятки и сотни раз в аналогичных точках ненарушенного массива.

Таблица. Значения критерия прочности σ_{Mo} , кПа

Table. Mohr criteria σ_{Mo} , kPa

Глубина Depth	Расстояние от откоса Distance from the slope	Ненару- шенный трещинами уступ Unbroken ledge	Падение трещин Falling cracks	
			от откоса from the slope	к откосу to the slope
	м/м			
5	0–5	10	14,1	46,4
	15–20	–	10,9	–
	30–35	9,5	106,5	9
10	0–5	21	63,7	51,4
	15–20	–	65,6	47,6
	30–35	7,2	86	63
15	0–5	28,3	25	46,4
	15–20	3,9	135,3	84,8
	30–35	4,5	29,4	–
20	0–5	30,5	30,8	47,6
	15–20	3,9	69,4	13,5
	30–35	2,4	235,5	7,9
25	0–5	40	61,2	36,8
	15–20	–	1,1	112,3
	30–35	–	–	2,4
29	0–5	–	39,9	58,9
	15–20	–	153,2	23,5
	30–35	–	–	7,3

С учётом того, что рассматривалась модель НДС отдельного уступа без учёта возможности смещения его нижней площадки (защемлённая среда, например, в условиях дна карьерной выемки или места размещения внутреннего отвала), картина распределения напряжений имеет значительные отличия от случая, когда рассматриваемый уступ является частью борта в верхней или средней части разреза. В таком случае

влияние выше- и нижележащих уступов будет существенным образом менять картину НДС как всего массива в целом, так и рассматриваемого уступа в частности.

Анализ приведенных значений показывает, что применение метода конечных элементов для расчёта НДС массива горных пород без учёта структурных особенностей строения массива (особенно вблизи горных выработок) даёт значительно заниженные значения действующего критерия прочности. Применение различного рода коэффициентов, учитывающих структурные особенности массива, также может не дать реальной картины распределения зон опасных напряжений, поскольку нет единой методики определения соответствующих коэффициентов в зависимости от параметров трещиноватости и их соотношения с геометрией и положением в пространстве горных выработок.

Выводы

1. Максимальные значения критерия прочности осложнённого системами трещин ненагруженного уступа не превосходят предела прочности на растяжение рассматриваемой породы, т. е. можно считать, что устойчивость данного породного уступа не нарушена. Аналогичная картина распределения значений критерия прочности наблюдается и для нагруженного оборудованием уступа, однако в этом случае увеличенные максимальные значения критерия прочности в совокупности с соотношением направлений растягивающих усилий и параметров трещиноватости говорят о том,

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. From discrete to continuum modelling of boundary value problems in geomechanics: an integrated FEM-DEM approach / J. Desrués, A. Argilaga, D. Caillierie, G. Combe, T.K. Nguyen, V. Richefeu, S. dal Pont // *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. – 2019. – V. 43. – Iss. 5. – P. 919–955. DOI: 10.1002/nag.2914.
2. Forward solver for deep earth exploration and induction logging using custom built Edge-Element FEM technique / Mingyang Lu, Wuliang Yin, Shijie Sun, Jiangtao Sun, Zhang Cao, Lijun Xu // *Acta Geologica Sinica – English Edition*. – 2019. – V. 93. – Iss. S1. – P. 302–304. DOI: <https://doi.org/10.1111/1755-6724.14107>
3. Xie Jiatong, Qin Qirong, Fan Cunhui. Quantitative prediction of fracture distribution of the Longmaxi formation in the Dingshan Area, China using FEM numerical simulation // *Acta Geologica Sinica – English Edition*. – 2019. – V. 93. – Iss. 6. – P. 1662–1672. DOI: 10.1111/1755-6724.13815
4. Sertabipoglu Zeynep, Ozer Umit, Tuncdemir Hakan. Assessment of slope instability with effects of critical displacement by using InSAR and FEM // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2020. – V. 13. – Iss. 4. DOI: 10.1007/s12517-020-5164-8
5. Analysing stress field conditions of the Colima Volcanic Complex (Mexico) by integrating finite-element modelling (FEM) simulations and geological data / S. Massaro, R. Sulpizio, G. Norini, G. Groppelli, A. Costa, L. Capra, G. Lo Zupone, M. Porfido, A. Gabrieli // *Solid Earth*. – 2020. – V. 11. – Iss. 6. – P. 2515–2533. DOI: 10.5194/se-11-2515-2020
6. Numerical analysis of slope stability under reservoir water level fluctuations using a FEM-LEM-combined method / Meng Qingxiang, Qian Kun, Zhong Lin, Gu Jinjian, Li Yue, Fan Kaifeng, Yan Long // *Geofluids*. – 2020. – Article ID 6683311. DOI: 10.1155/2020/6683311. URL: https://www.researchgate.net/publication/348022606_Numerical_Analysis_of_Slope_Stability_

что для оценки устойчивости откосных сооружений физико-механических свойств горных пород явно недостаточно. Совпадение направления действия растягивающих напряжений и направления нормалей к берегам трещин, даже не относящихся к главным системам, ведёт к значительному риску их развития в массиве вплоть до полной потери устойчивости последнего.

2. Решение методом конечных элементов плоской задачи напряжённо-деформированного состояния массива горных пород в окрестности открытой горной выработки выявило зоны опасной концентрации растягивающих напряжений и направления их действия на горные породы в зависимости от взаимного положения откоса уступа и трещин в нём.
3. Результаты проведенного исследования рассматриваются авторами как основа создания методики учёта влияния параметров трещиноватости на распределение напряжений внутри массива горных пород. Особенно актуально данное исследование для прогноза устойчивости откосных сооружений при ведении открытых горных работ, сооружении земляных выемок в трещиноватых скальных массивах. Применение геомеханического обоснования устойчивости откосных сооружений с учётом параметров трещиноватости может послужить отправной точкой для принятия технологических решений, направленных на изменение положения горных выработок в пространстве для повышения их устойчивости.

under Reservoir Water Level Fluctuations Using a FEM-LEM-Combined Method (дата обращения: 07.08.2021).

7. Investigating the effect of jointed environment on the cracked concrete arch dam in 3D conditions using FEM / Armaghani Danial Jahed, Bayat Vahid, Koopalipoor Mohammadreza, Binh Thai Pham // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. – 2020. – V. 80. – Iss. 1. – P. 55–70. DOI: 10.1007/s10064-020-01935-3
8. Kaya Ayberk, Uzun Salih. 2D- and 3D-FEM modeling of rock masses at the Silenkar viaduct site (NE Turkey) with regard to bearing capacity // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2021. – V. 14. – Iss. 17. – Article ID 1726. DOI: 10.1007/s12517-021-08208-7
9. A discontinuous discrete fracture model for coupled flow and geomechanics based on FEM / Wei Shiming, Kao Jiawei, Jin Yan, Shi Can, Xia Yang, Liu Shun // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2021. – V. 204. – P. 108677. DOI: 10.1016/j.petrol.2021.108677
10. Numerical simulation of dynamic catastrophe of slope instability in three Gorges reservoir area based on FEM and SPH method / Su Zhengyang, Wang Guizhi, Wang Yakun, Luo Xiang, Zhang Hao // *Natural Hazards*. – 2021. DOI: 10.1007/s11069-021-05075-z
11. Dudek M., Tajdus K. FEM for prediction of surface deformations induced by flooding of steeply inclined mining seams // *Geomechanics for Energy and the Environment*. – 2021. – V. 28. – P. 100254. DOI: 10.1016/j.gete.2021.100254. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352380821000228?via%3Dihub> (дата обращения: 07.08.2021).
12. Kinematic-based failure angle analysis for discontinuity-controlled rock slope instabilities: a case study of Ren Yi Peak Cluster in Fusong County, China / Jianhua Yan, Jianping Chen, Yuchao Li, Zhihai Li, Yansong Zhang, Xin Zhou, Qaiser Mehmood, Jing Liu, Zhou Wang // *Nat Hazards*. – 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05137-2>

13. A multidisciplinary approach to study slope instability in the Alboran Sea shoreline: study of the Tamegaret deep-seated slow-moving landslide in Northern Morocco / A. Bounab, Y. El Kharim, R. El Hamdouni, R. Hlila // *Journal of African Earth Sciences*. – 2021. – V. 184. – P. 104345. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2021.104345
14. Efficient slope reliability analysis using adaptive classification-based sampling method / Li Xueyou, Liu Yadong, Yang Zhiyong, Meng Zhenzhu, Zhang Limin // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. – 2021. – V. 80. – Iss. 12. – P. 8977–8993. DOI: 10.1007/s10064-021-02476-z
15. Hoek E., Bray J.W. *Rock slope engineering*. – London: Institution of Mining and Metallurgy, 1977. – 402 p.
16. Tang Chun'An, Hudson J.A. *Rock failure mechanisms: illustrated and explained*. – London: CRC Press, 2010. – 364 p.
17. Zárate F., Oñate E. A simple FEM–DEM technique for fracture prediction in materials and structures // *Computational Particle Mechanics*. – 2015. – № 2 (3). – P. 301–314. DOI: 10.1007/s40571-015-0067-2.
18. Insights on surface spalling of rock / A. Tarokh, C.S. Kao, A. Fakhimi, J.F. Labuz // *Computational Particle Mechanics*. – 2016. – № 3. – P. 391–405. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40571-016-0108-5>
19. Look Burt G. *Handbook of geotechnical investigation and design tables*. – London: Taylor & Francis Group, 2007. – 331 p. URL: https://www.academia.edu/5234867/Hand_Book_of_Geotechnical_Investigation_and_Design_Tables (дата обращения: 03.05.2021).
20. Majid Noorian Bidgolia, Zhihong Zhaob, Lanru Jing. Numerical evaluation of strength and deformability of fractured rocks // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. – 2013. – V. 5. – Iss. 6. – P. 419–430. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrmge.2013.09.002>
21. Mahabadi O., Lisjak A. Application of FEMDEM to analyze fractured rock masses // *International Discrete Fracture Network Engineering Conference*. – Vancouver, BC, 2014. DOI: 10.13140/2.1.4463.9687. URL: https://www.researchgate.net/publication/267776841_Application_of_FEMDEM_to_analyze_fractured_rock_masses (дата обращения: 03.05.2021).
22. Ylber Muceku, Oltion Korini, Alban Kuriqi. Geotechnical analysis of hill's slopes areas in heritage town of Berati, Albania // *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. – 2016. – № 60 (1). – P. 61–73. DOI: 10.3311/PPci.7752
23. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200000 Издание второе. Серия Кузбасская. Лист N-45-IX (Крапивинский). Объяснительная записка / П.Ф. Лавренов, Б.А. Снежко, А.Ф. Щигрев и др. – М.: МФ ВСЕГЕИ, 2015. – 156 с.
24. Физико-технические свойства горных пород и углей Кузнецкого бассейна: справочник / Г.Г. Штумпф, Ю.А. Рыжков, В.А. Шаламанов, А.И. Петров. – М.: Недра, 1994. – 447 с.
25. Мартыанов В.Л. Оценка сложности отработки карьерных полей угольных месторождений Кузбасса // *Техника и технология горного дела*. – 2018. – № 1. – С. 35–41. DOI: 10.26730/2618-7434-2018-1-35-41
26. Gogolin V., Lesin Y., Djagileva A. The length of bearing pressure zone for the flat seams extraction in a linear deformation rock // *E3S Web of Conferences*. – 2017. DOI: 10.1051/e3sconf/20171501001. URL: https://www.researchgate.net/publication/315958632_The_Length_Of_Bearing_Pressure_Zone_For_The_Flat_Seams_Extraction_In_A_Linear_Deformation_Rock (дата обращения: 03.05.2021).
27. Ольховатенко В.Е. *Инженерная геология угольных месторождений Кузнецкого бассейна*. – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2014. – 150 с.
28. Кацубин А.В., Федотов А.А. Систематизация горно-геологических условий угленасыщенных и безугольных зон разрезов Кузбасса // *Техника и технология горного дела*. – 2019. – № 3. – С. 60–75. DOI: 10.26730/2618-7434-2019-3-60-75
29. Бестранспортная технология разработки законсервированных запасов угля по пласту VI на разрезе «Томусинский» / М.А. Тюленев, С.О. Марков, А.Б. Паламарчук, Т.Н. Гвоздкова // *Техника и технология горного дела*. – 2020. – № 3 (10). – P. 18–57. DOI: 10.26730/2618-7434-2020-3-18-57
30. The features of three-and four-tier internal dumps capacity calculation with the additional capacity preparation in the dump tiers / T. Gvozdikova, E. Kuznetsov, A. Rudakova, S. Markov // *E3S Web of Conferences*. – 2017. – V. 15. – Article 01008. DOI: 10.1051/e3sconf/20171501008. URL: https://www.researchgate.net/publication/315993559_The_features_of_three-and_four-tier_internal_dumps_capacity_calculation_with_the_additional_capacity_preparation_in_the_dump_tiers (дата обращения: 03.05.2021).
31. Influence of the rigid connection between discs in the tetrahedral prisms on equivalent stresses when cutting work faces / A.A. Khoreshok, L.E. Mametyev, A.Y. Borisov, A.V. Vorobyev // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – V. 127 (1). – Article 012039. DOI: 10.1088/1757-899X/127/1/012039. URL: https://www.researchgate.net/publication/302062016_Influence_of_the_Rigid_Connection_Between_Discs_in_the_Tetrahedral_Prism_on_Equivalent_Stresses_When_Cutting_Work_Faces (дата обращения: 03.05.2021).

Поступила: 02.10.2021 г.

Информация об авторах

Марков С.О., кандидат технических наук, доцент кафедры маркшейдерского дела и геологии Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева; доцент, Филиал Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева в г. Междуреченске.

Хорешок А.А., доктор технических наук, профессор, директор Горного института Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева.

Тюленев М.А., кандидат технических наук, профессор кафедры открытых горных работ Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева.

UDC 622.011.4

INFLUENCE OF FRACTURE INCIDENCE ANGLE ON THE LOCAL STRESS STATE OF THE NEAR-SLOPE ZONE OF THE OVERBURDEN LEDGE

Sergey O. Markov¹,
markovso@kuzstu.ru

Alexey A. Khoreshok¹,
haa.omit@kuzstu.ru

Maxim A. Tyulenev¹,
tma.geolog@kuzstu.ru

¹ T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University,
28, Vesennaya street, Kemerovo, 650000, Russia.

² Mezhdurechensk Branch of T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University,
36, Stroiteley avenue, Mezhdurechensk, 652877, Russia.

Relevance. The stress-strain state of the rock massif during open-pit mining of mineral deposits, as well as during construction in excavations of significant size, depends on both the mechanical properties of rocks and the structural and textural features of the rock massif. In particular, the presence of cracks in the near-slope zone of the ledge can significantly weaken its stability, and the direction and angle of crack incidence relative to the ledge slope change the location of stress zones within the massif relative to the surface of the outcrop. The identification of zones of increased mechanical stresses in order to predict the behavior of rock massifs with different structural-textural properties is an urgent scientific and practical task.

The main aim is identification of the stress concentration zones in the near-slope part of the ledge in the rock massif with different structural-textural properties during open-pit mining.

Methods: mathematical modeling of rock massifs with regard to their physical and mechanical properties and structural and textural features using the finite element method, processing the results of experimental studies.

Results. The paper introduces the description of the mathematical model of the elastic behavior of a natural fractured rock massif with an outcrop surface in the form of a ledge, as well as the laws of stress concentration distribution in it. The stress-strain state of loaded and unloaded massifs in the undisturbed and disturbed by cracks of different orientation states is described, and their values for ledges with different structure are compared. The authors have revealed the increased values of tensile stresses in the massif in the direction of crack incidence from the ledge slope compared to the undisturbed state and in the direction of crack incidence toward the ledge slope.

Key words:

Finite element method, stress-strain state, rock stability, fracturing, stress concentration, rock massif structure.

REFERENCES

- Desrues J., Argilaga A., Caillerie D., Combe G., Nguyen T.K., Richefeu V., Dal Pont S. From discrete to continuum modelling of boundary value problems in geomechanics: an integrated FEM-DEM approach. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2019, vol. 43, Iss. 5, pp. 919–955. DOI: 10.1002/nag.2914.
- Mingyang Lu, Wuliang Yin, Shijie Sun, Jiangtao Sun, Zhang Cao, Lijun Xu. Forward solver for deep earth exploration and induction logging using custom built Edge-Element FEM technique. *Acta Geologica Sinica – English Edition*, 2019, vol. 93, Iss. S1, pp. 302–304. DOI: <https://doi.org/10.1111/1755-6724.14107>
- Xie Jiatong, Qin Qirong, Fan Cunhui. Quantitative prediction of fracture distribution of the Longmaxi formation in the Dingshan area, China using FEM numerical simulation. *Acta Geologica Sinica – English Edition*, 2019, vol. 93, Iss. 6, pp. 1662–1672. DOI 10.1111/1755-6724.13815
- Sertabipoglu Zeynep, Ozer Umit, Tuncdemir Hakan. Assessment of slope instability with effects of critical displacement by using InSAR and FEM. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, vol. 13, Iss. 4. DOI: 10.1007/s12517-020-5164-8
- Massaro S., Sulpizio R., Norini G., Groppelli G., Costa A., Capra L., Lo Zupone G., Porfido M., Gabrieli A. Analysing stress field conditions of the Colima Volcanic Complex (Mexico) by integrating finite-element modelling (FEM) simulations and geological data. *Solid Earth*, 2020, vol. 11, Iss. 6, pp. 2515–2533. DOI: 10.5194/se-11-2515-2020
- Meng Qingxiang, Qian Kun, Zhong Lin, Gu Jinjian, Li Yue, Fan Kaifeng, Yan Long. Numerical analysis of slope stability under reservoir water level fluctuations using a FEM-LEM-combined method. *Geofluids*, 2020, Article ID 6683311. DOI: 10.1155/2020/6683311. Available at: https://www.researchgate.net/publication/348022606_Numerical_Analysis_of_Slope_Stability_under_Reservoir_Water_Level_Fluctuations_Using_a_FEM-LEM-Combined_Method (accessed 07 August 2021).
- Armaghani Danial Jahed, Bayat Vahid, Koopialipour Mohammadreza, Binh Thai Pham. Investigating the effect of jointed environment on the cracked concrete arch dam in 3D conditions using FEM. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, vol. 80, Iss.1, pp. 55–70. DOI: 10.1007/s10064-020-01935-3
- Kaya Ayberk, Uzun Salih. 2D- and 3D-FEM modeling of rock masses at the Silenkar viaduct site (NE Turkey) with regard to bearing capacity. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, vol. 14, Iss. 17, Article ID 1726. DOI: 10.1007/s12517-021-08208-7
- Wei Shiming, Kao Jiawei, Jin Yan, Shi Can, Xia Yang, Liu Shun. A discontinuous discrete fracture model for coupled flow and geomechanics based on FEM. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, vol. 204, p. 108677. DOI: 10.1016/j.petrol.2021.108677
- Su Zhengyang, Wang Guizhi, Wang Yakun, Luo Xiang, Zhang Hao. Numerical simulation of dynamic catastrophe of slope instability in three Gorges reservoir area based on FEM and SPH method. *Natural Hazards*, 2021. DOI: 10.1007/s11069-021-05075-z
- Dudek M., Tajdus K. FEM for prediction of surface deformations induced by flooding of steeply inclined mining seams. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 2021, vol. 28, p. 100254. DOI: 10.1016/j.gete.2021.100254. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352380821000228?via%3Dihub> (accessed 07 August 2021).
- Jianhua Yan, Jianping Chen, Yuchao Li, Zhihai Li, Yansong Zhang, Xin Zhou, Qaiser Mehmood, Jing Liu, Zhou Wang. Kine-

- matic-based failure angle analysis for discontinuity-controlled rock slope instabilities: a case study of Ren Yi Peak Cluster in Fusong County, China. *Nat Hazards*, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05137-2>.
13. Bounab A., El Kharim Y., El Hamdouni R., Hlila R. A multidisciplinary approach to study slope instability in the Alboran Sea shoreline: study of the Tamegaret deep-seated slow-moving landslide in Northern Morocco. *Journal of African Earth Sciences*, 2021, vol. 184, p. 104345. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2021.104345
 14. Li Xueyou, Liu Yadong, Yang Zhiyong, Meng Zhenzhu, Zhang Limin. Efficient slope reliability analysis using adaptive classification-based sampling method. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, vol. 80, Iss. 12, pp. 8977–8993. DOI: 10.1007/s10064-021-02476-z
 15. Hoek E., Bray J.W. *Rock slope engineering*. London, Institution of Mining and Metallurgy, 1977. 402 p.
 16. Tang Chun'An, Hudson J.A. *Rock failure mechanisms: illustrated and explained*. London, CRC Press, 2010. 364 p.
 17. Zárate F., Oñate E. A simple FEM–DEM technique for fracture prediction in materials and structures. *Computational Particle Mechanics*, 2015, no. 2 (3), pp. 301–314. DOI: 10.1007/s40571-015-0067-2.
 18. Tarokh A., Kao C.S., Fakhimi A., Labuz J.F. Insights on surface spalling of rock. *Computational Particle Mechanics*, 2016, no. 3, pp. 391–405. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40571-016-0108-5>
 19. Look Burt G. *Handbook of geotechnical investigation and design tables*. London, Taylor & Francis Group, 2007. 331 p. Available at: https://www.academia.edu/5234867/Hand_Book_of_Geotechnical_Investigation_and_Design_Tables (accessed 03 May 2021).
 20. Majid Noorian Bidgolia, Zhihong Zhaob, Lanru Jing. Numerical evaluation of strength and deformability of fractured rocks. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2013, vol. 5, Iss. 6, pp. 419–430. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrmge.2013.09.002>
 21. Mahabadi O., Lisjak A. Application of FEMDEM to analyze fractured rock masses. *International Discrete Fracture Network Engineering Conference*. Vancouver, BC, 2014. DOI: 10.13140/2.1.4463.9687. Available at: https://www.researchgate.net/publication/267776841_Application_of_FEMDEM_to_analyze_fractured_rock_masses (accessed 03 May 2021).
 22. Ylber Muceku, Oltion Korini, Alban Kuriqi. Geotechnical analysis of hill's slopes areas in heritage town of Berati, Albania. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 2016, no. 60 (1), pp. 61–73. DOI: 10.3311/PPci.7752
 23. Lavrenov P.F., Snezhko B.A., Shchigrev A.F. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Mashtab 1:200000 Izdanie vtoroe. Seriya Kuzbasskaya. List N-45-IX (Krapivinskij). Obyasnitelnaya zapiska* [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:200000. Second edition. Kuzbass series. Sheet N-45-IX (Krapivinsky). Explanatory letter]. Moscow, MF VSEGEI Publ., 2015. 156 p.
 24. Shtumpf G.G., Ryzhkov Yu.A., Shalamanov V.A., Petrov A.I. *Fiziko-tehnicheskie svoystva gornyykh porod i ugley Kuznetskogo basseyna: spravochnik* [Physical and technical properties of rocks and coals of the Kuznetsk Basin: handbook]. Moscow, Nedra Publ., 1994. 447 p.
 25. Martyanov V.L. Evaluation of the working out difficulty on quarry fields of Kuzbass coal deposits. *Journal of Mining and Geotechnical Engineering*, 2018, no. 1, pp. 35–41. In Rus. DOI: 10.26730/2618-7434-2018-1-35-41.
 26. Gogolin V., Lesin Y., Djagileva A. The length of bearing pressure zone for the flat seams extraction in a linear deformation rock. *E3S Web of Conferences*. 2017. DOI: 10.1051/e3sconf/20171501001. Available at: https://www.researchgate.net/publication/315958632_The_Length_Of_Bearing_Pressure_Zone_For_The_Flat_Seams_Extraction_In_A_Linear_Deformation_Rock (accessed 03 May 2021).
 27. Olkhovatenko V.E. *Inzhenernaya geologiya ugolnykh mestorozhdeniy Kuznetskogo basseyna* [Engineering geology of coal deposits of the Kuznetsk Basin]. Tomsk, TSUAB Publ., 2014. 150 p.
 28. Katsubin A.V., Fedotov A.A. Systematization of the mining and geological conditions of the coal-bearing and coal-free zones of the Kuzbass open pits. *Journal of Mining and Geotechnical Engineering*, 2019, no. 3, pp. 60–75. In Rus. DOI: 10.26730/2618-7434-2019-3-60-75.
 29. Tyulenev M., Markov S., Palamarchuk A., Gvozdokva T. Direct dumping technology of stockpiled coal reserves mining along the seam VI at the Tomusinsky open pit mine. *Journal of Mining and Geotechnical Engineering*, 2020, no. 3 (10), pp. 18–57. In Rus. DOI: 10.26730/2618-7434-2020-3-18-57.
 30. Gvozdokva T., Kuznetsov E., Rudakova A., Markov S. The features of three-and four-tier internal dumps capacity calculation with the additional capacity preparation in the dump tiers. *E3S Web of Conferences*, 2017, vol. 15. Article 01008. DOI: 10.1051/e3sconf/20171501008. Available at: https://www.researchgate.net/publication/315993559_The_features_of_three_and_four-tier_internal_dumps_capacity_calculation_with_the_additional_capacity_preparation_in_the_dump_tiers (accessed 03 May 2021).
 31. Khoreshok A.A., Mametyev L.E., Borisov A.Y., Vorobyev A.V. Influence of the rigid connection between discs in the tetrahedral prisms on equivalent stresses when cutting work faces. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 127 (1). Article 012039. Available at: https://www.researchgate.net/publication/302062016_Influence_of_the_Rigid_Connection_Between_Discs_in_the_Tetrahedral_Prisms_on_Equivalent_Stresses_When_Cutting_Work_Faces (accessed 03 May 2021).

Received: 2 October 2021.

Information about the authors

Sergey O. Markov, Cand. Sc., associate professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University; associate professor, Mezhdurechensk Branch of T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University.

Alexey A. Khoreshok, Dr. Sc., professor, director, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University.

Maxim A. Tyulenev, Cand. Sc., professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University.