© С.А. Юфин, Е.В. Ламонина, 2008

УДК 622.23.054.72

С.А. Юфин, Е.В. Ламонина

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТРЕЩИНОВАТЫХ СКАЛЬНЫХ ПОРОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ

Рассмотрен новый подход к численному моделированию массивов, рассеченных заполненными трещинами с некоторой шириной раскрытия.

Семинар № 4

Скальные породы являются очень сложным и противоречивым объектом исследований. Они формируются в различных геологических и климатических условиях под воздействием самых разнообразных факторов, и представляют собой дискретные многокомпонентные композитные тела природного образования. Они характеризуются неоднородностью и часто анизотропией, что вызвано слоистостью и наличием трещин практически в каждой скальной породе, которые напрямую влияют на прочность и деформируемость массивов.

Современные численные технологии позволяют создавать модели реальных массивов и, избежав влияния масштабного эффекта, оценивать параметры массива, нарушенного системами трещин. Однако в существующих рекомендациях в основном рассматриваются предельные виды нарушений сплошности, такие как разрывы или крупные трещины с одной стороны и сети тонких незаполненных трещин с другой. В связи с этим, представляется важным совершенствование методов моделирования скальных массивов, рассеченных трещинами с некоторой шириной раскрытия, имеющими в полости заполнитель.

1. *Сравнение различных подходов к моделированию трещиноватых пород.*

Рассмотрим образец трещиноватой породы, характеристики которого приведены в табл. 1.

Все исследования, выполненные в данной работе, проведены с использованием метода конечных элементов на базе программного комплекса для решения геомеханических задач Z_SOIL.PC® [11].

– В численном моделировании существует три основных способа представления трещиноватых массивов:

1) Трещины моделируются в виде контактов с помощью контактного элемента [7].

2) Трещиноватый массив заменяется сплошной эквивалентной средой и моделируется многослойной моделью [6, 10].

3) Отдельные трещины представляются слоем обычных 4-х узловых конечных элементов (при двумерном моделировании) или 8-ми узловых (при трехмерном).

При использовании последнего способа моделирования трещиноватых об-

Таблица 1

Наименование	Значение
Параметры ненарушенной скальной породы	
Модуль упругости E_i, ГПа	25
Коэффициент Пуассона ν_i	0.2
Предел прочности на одноосное сжатие σ_{ci}, МПа	100
Предел прочности на одноосное растяжение σ_{ti}, МПа	10
Удельное сцепление c_i, МПа	25
Угол внутреннего трения φ_i, °	41
Размер блока ненарушенной скальной породы а, м	1
Параметры трещин	
ширина раскрытия трещины Δа, м	0.001
относительная ширина раскрытия трещины α	0.001
относительная площадь скальных контактов ξ	$4\cdot10^{-5}$
Удельное сцепление c_j, кПа	50
Угол внутреннего трения φ_j, °	35

разцов предполагается, что слой, содержащий трещину, включает в себя также и ослабленную зону оперения данной трещины, то есть параметры слоя элементов должны учитывать как свойства непосредственно заполнителя трещины, так и свойства блоков ненарушенной породы. Учесть и те, и другие параметры можно путем усреднения характеристик в пределах слоя элементов. Используем для этого метод асимптотического усреднения, предложенный в работе [1].

Определим неизвестный модуль деформации трещины *Ej*, учитывая относительную площадь скальных контактов [3]:

$$E_j = \xi E_i = 4\cdot10^{-5}\cdot25000 \text{ МПа} = 1 \text{ МПа} \quad (1)$$

Примем относительную ширину слоя элементов, моделирующего трещину с учетом ослабленной зоны, равную l = 10 см (рис. 1).

Определим модуль деформации слоя, включающего трещину, по зависимости, предложенной в [1]:

$$Em = \frac{E_j \cdot E_i}{E_j + \alpha E_i} = 962 \text{ МПа}. \quad (2)$$

Для проведения серии численного эксперимента, где трещина моделируется контактным элементом, необходимо определить касательную и нормальную жесткости трещин.

Из зависимости

$E_j = \Delta l k_n$,

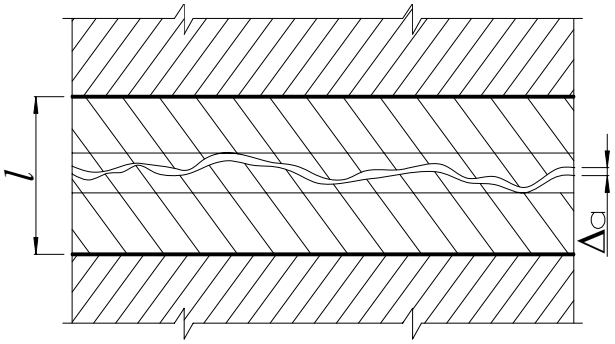

Рис. 1. Определение ширины слоя, моделирующего трещину

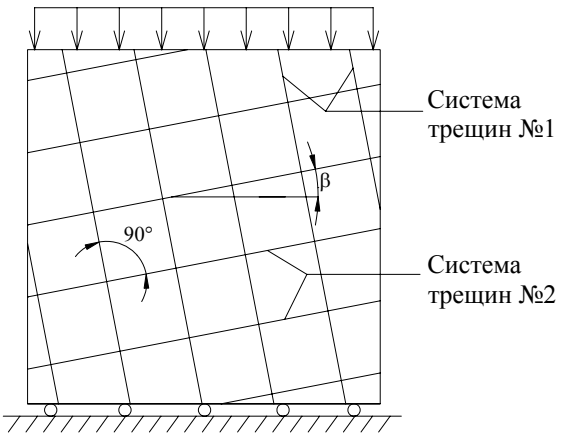

Рис. 2. Схема трещиноватого образца скальной породы

(3)

где $\Delta l = l/a$ - относительная ширина слоя, моделирующего трещину, можно определить нормальную жесткость трещины:

$k_n = E_j / \Delta l = 962$ МПа/0.1 = 9620 МПа (4)

Тогда сдвиговая жесткость трещины [4]:

$k_S = 0.4 k_n = 0.4 \cdot 9620$ МПа = =3848 МПа (5)

Чаще всего, при моделировании трещин слоем элементов, для последнего применяется модель упруго-пластической среды с разрушением по критерию Кулона-Мора (6). Для блоков ненарушенной скальной породы – критерий разрушения Хука-Брауна (7).

$$|\tau| = \sigma_n \mathrm{tg}\varphi + c \text{ [2]}, \qquad (6)$$

где τ - предельное касательное напряжение, σ_n – нормальное напряжение, c – сцепление, φ – угол внутреннего трения.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci}\sqrt{m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s} \text{ [8]}, \qquad (7)$$

где σ_1, σ_2, σ_3 – главные напряжения, σ_{ci} – предел прочности на одноосное сжатие образца, m_i, s – параметры, определяемые для каждой отдельной породы.

С целью расширения возможностей использования многослойной мо-дели и исследования способов представления в численном виде трещиноватого массива пород, в рамках третьего способа моделирования предлагается использовать многослойную модель материала для слоя, заменяющего трещину. Таким образом, в численном эксперименте будем проводить четыре серии исследования образцов. Для получения более полной картины рассмотрим в каждой серии образцы с различными углами падения трещин.

Учет представительности выполнен путем определения минимально необходимого количества блоков в образце, которое удовлетворяет критерию квазисплошности и квазиоднородности [5]:

$$n_k = \frac{2\left[\begin{array}{l}(100+k)(A+1)M_T B - \\ -100(M_a A + 2M_T B)\end{array}\right]}{k(A+1)(M_a A + 2M_T B)}, \qquad (8)$$

где k = 5 % – принятая точность, а = =1 м – расстояние между трещинами, l = 0.1 м – величина слоя, моделирующего трещину, E_a, μ_a, E_m, μ_m – модули деформации и коэффициенты поперечной деформации материала блоков и трещин, E_L – средний модуль деформации, $A = a/l = 1/0.1 = 10$, $B = E_a/E_T = 25.9$, $M_a = 1\text{-}2\mu_a = 0.6$, $M_T = 1\text{-}2\mu_T = 1$.

Количество блоков составило по 5 в каждом направлении. Схема рассматриваемого образца приведена на

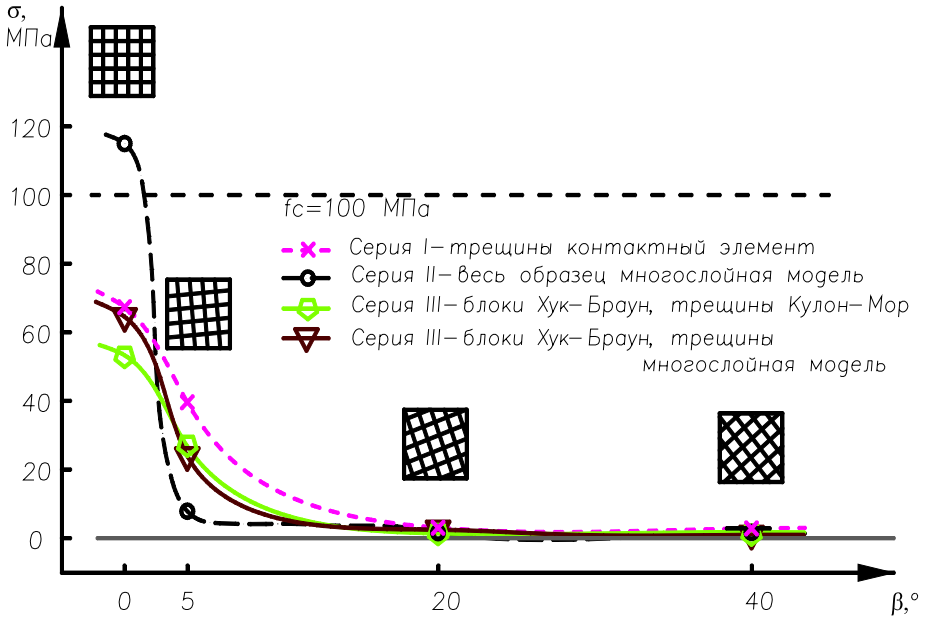

Рис. 3. Графики предела прочности трещиноватого образца для каждой серии расчета в зависимости от угла наклона β

рис. 2. Угол β – угол поворота системы трещин №2 от горизонтали – принят равным: $\beta = 0°$ (0°; 90°), $\beta = 5°$ (5°; 85°), $\beta = 20°$ (20°; 70°), $\beta = 40°$ (40°; 50°). При этом угол между системами трещин остается постоянным и равен 90°.

Были выполнены следующие серии численного моделирования трещиноватых образцов в условиях одноосного сжатия:

Серия I – блоки ненарушенной породы моделировались с помощью критерия Хука-Брауна, трещины представлены контактными элементами с нормальной и касательной жесткостями.

Серия II – трещины, рассекающие образец, не моделировались специально, поведение образца рассматривалось на регулярной ортогональной сетке и описывалось многослойной моделью. Напластования располагаются под углом, равным углу наклона трещин β.

Серия III – трещины представлены в виде слоя конечных элементов с шириной, соответствующей ширине раскрытия трещины Δa с учетом ослабленной зоны. Разрушение материала ненарушенных блоков скальной породы происходит по критерию Хука-Брауна, трещин – по критерию Кулона-Мора.

Серия IV – трещины представлены в виде слоя конечных элементов как и в Серии III. Ненарушенные блоки моделировались критерием Хука-Брауна, а материал трещин – многослойной моделью, Угол наклона ослабленных слоев задавался равным углу наклона трещин систем №1 и № 2.

По результатам расчета был построен график изменения предела прочности трещиноватых образцов для каждой серии эксперимента (рис. 3). Значительное отличие кривой Серии II от остальных говорит о нерациональности применения такой модели для описания материала,

обладающего предложенными геометрическими характеристиками (в частности, при размере блоков ненарушенной породы, заметно превышающих ширину раскрытия трещин). Также видно, что применимость той или иной модели зависит от угла наклона трещин. Предложенная комбинированная модель материалов, состоящая из многослойной модели для трещин и критерия Хука-Брауна для ненарушенной породы, реализованная в Серии IV численного эксперимента, позволяет получить результаты, по характеру схожие с другими методами моделирования трещиноватого образца.

Проведем сравнение значений модуля деформации трещиноватого образца, рассеченного ортогональными системами трещин с углом наклона $\beta = 0°$ со значениями модуля деформации, полученными аналитическим путем. При этом не рассматривался образец, представленный многослойной моделью в чистом виде в связи со значительным расхождением результатов этой серии эксперимента с остальными сериями. Величины модуля деформации трещиноватого образца для различных серий составили: Серия I – $\bar{E}$ = 5768.6 МПа, Серия III – $\bar{E}$ = 5330.0 МПа, Серия IV – $\bar{E}$ = =5733.3 МПа.

Определение эффективного модуля деформации производилось по зависимости [1]:

$$E_{\perp} = \frac{E_j E_i}{E_j + \alpha E_i} = 6946.8\text{МПа} \qquad (9)$$

Сравнение показало, что наименьшее расхождение аналитических и численных данных наблюдается в результатах серии I (моделирование трещин контактным элементом) и серии IV (моделирование трещин слоем, представленным многослойной моделью) – 20.4 % и 21.2 % соответственно. Модуль деформации, полученный в серии III при использовании критерия разрушения Кулона-Мора в слое, моделирующем трещину, намного отличается от остальных. Расхождение составило 30.3 %. По результатам сравнения можно сделать вывод, что для моделирования трещин в образце скальной породы наряду с контактным элементом можно использовать многослойную модель материала. В случае, если ненарушенные блоки породы моделируются критерием Хука-Брауна, точность результатов численного моделирования сопоставима с аналитическим методом.

2. *Численный анализ влияния перевязки блоков составного образца на его прочностные параметры*

Проверка работоспособности предложенной выше модели трещиноватого массива, основанной на комбинации существующих моделей сплошной среды: упруго-пластической модели с разрушением по критерию Хука-Брауна для ненарушенных блоков скальной породы и многослойной модели для слоя, заменяющего трещину с ослабленной зоной оперения, проведена путем сравнения результатов численных и лабораторных экспериментов. Исследовалось влияние перевязки блоков составного образца на его эффективные прочностные свойства. Параметры ненарушенных блоков и материала трещин приведены в табл. 2.

Численный анализ проведен в трехмерной постановке. Образец нарушен тремя системами трещин, расположенными ортогонально друг к другу под углами 0° и 90°. Величина перевязки блоков составляла: s=0, 1/8, 2/8, 3/8, 4/8. В связи с симметрией, дальнейшее увеличение перевязки приведет к получению аналогичных результатов.

Нагрузка на образцы передавалась через перемещения верхней грани, уве-

Таблица 2

Наименование	Значение
Параметры ненарушенной скальной породы	
Модуль упругости E_i, ГПа	5.34
Коэффициент Пуассона ν_i	0.19
Предел прочности на одноосное сжатие σ_{ci}, МПа	17.13
Предел прочности на одноосное растяжение σ_{ti}, МПа	2.49
Удельное сцепление c_i, МПа	4.67
Угол внутреннего трения φ_i, °	33
Параметры трещин	
Модуль упругости E_j, ГПа	25.4
Коэффициент Пуассона ν_i	0
Относительная ширина слоя, моделирующего трещину Δl	0.1
Удельное сцепление c_j, кПа	0
Угол внутреннего трения φ_j, °	37

личение которых шло по линейному закону. Образцы считались разрушенными, когда максимальное значение вертикальных напряжений в каком либо из элементов достигало величины предела прочности ненарушенной породы на одноосное сжатие σ_{ci} =17.13МПа. В этот момент расчета определялись значения эффективных напряжений в образце.

В результате численного эксперимента были получены предельные значения сжимающих напряжений для блочных образцов. Для удобства сравнения результатов численного эксперимента с лабораторными данными [9] определен предел прочности образцов в процентах от предела прочности материала ненарушенных блоков $\sigma_{cr}=\sigma_{cj}/\sigma_{ci}\cdot 100$ %. Графические данные представлены на рис. 4. Предел прочности трещиноватых образцов в среднем составляет 65 % от предела прочности ненарушенной породы. Для кривой, отражающей результаты численного моделирования, в зависимости от величины перевязки блоков наблюдается некоторое изменение прочности от 10.18 МПа (59.43 %) для перевязки 's'=1/8 до 13.29 МПа (77.58 %) для перевязки 's'=0. Максимальной прочностью трещиноватый образец обладает при отсутствии смещения по трещине – 13.29 МПа. При увеличении перевязки прочность снижается до значения 10.18 МПа ('s'=1/8), а затем повышается до 11.47 МПа ('s'=4/8).

Характер кривой, полученной в результате лабораторных экспериментов, также отражает некоторое уменьшение прочности при росте перевязки от 68% (для 's'=0) до 56% (для 's'=1/8) с последующим ее увеличением до 68% (для 's'=4/8). Расхождение между кривыми лабораторного и численного экспериментов составило от 0.86% ('s'=3/8) до 9.58% ('s'=0).

Хорошее соответствие данных, полученных в результате численного моделирования и лабораторных исследований, позволяет сделать вывод о возможности применения предложенной модели трещины с использованием многослойной модели материала для определения напряженно-деформированного состояния трещиноватого образца. Результаты такого моделирования также могут быть перенесены на целый массив

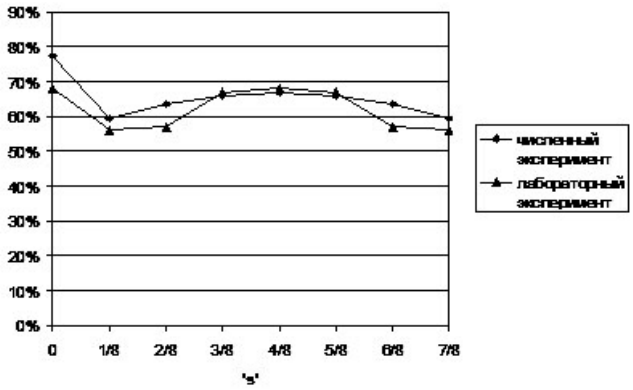

Рис. 4. Предел прочности трещиноватых образцов в процентах от предела прочности ненарушенной породы. Сравнение данных лабораторного и численного экспериментов

трещиноватых скальных пород при выполнении условия представительности.

3. *Практическое применение предложенной модели для анализа напряженно-деформированного состояния окрестности карьерной выемки*

Рассматриваемая комбинированная модель трещиноватых скальных массивов была использована при численном моделировании напряженного состояния массива пород в окрестности карьера «Железный» ОАО «Ковдорский ГОК», расположенного на Кольском полуострове.

Основными факторами, влияющими на распределение напряжений в массиве вокруг карьера, являются форма карьерной выемки, исходное напряженное состояние массива пород, а также крупные структурные нарушения, залегающие в пределах расчетной области. На примере карьера по добыче апатито-нефелиновых руд, разрабатываемого на пересечении нескольких крупных разломов, показано определение напряженно-деформированного состояния массива в объемной постановке. Расчет проведен для состояния

карьера на 2004 г., угол наклона бортов составил 45°, а глубина карьера – 450 м.

Карьерная выемка представляет собой в плане овал правильной формы вытянутый по направлению «север-юг». Размеры в плане на поверхности: «север-юг» – 2.5 км; «запад-восток» – 1.5 км. Размеры области массива, вмещающего карьерную выемку, приняты 18×18 км.

Структурные нарушения первого ранга представляют собой крупные разломы шириной 0.1 км. В вертикальной плоскости границы структурных нарушений приняты вертикальными. В горизонтальной плоскости структурные нарушения прослеживаются за пределами карьерного поля до границ расчётной области. Зона карьерной выемки разделена на 20 инженерно-геологических блоков (ИГБ), в которых наблюдаются нарушения сплошности второго ранга. В каждом из ИГБ присутствует от 2 до 4 сетей трещин, различающихся азимутом линии простирания и углом падения.

Механические параметры вмещающего массива пород и структурных нарушений приведены в табл. 3, а геометрические и прочностные характеристики структурных неоднородностей I и II рангов – в табл. 4.

Расчет проведен для гравитационного типа напряжённого состояния (собственный вес горных пород с учётом бокового отпора). Разломы I ранга представлены в конечно-элемент-ной модели слоем элементов с использованием многослойной модели среды. Вследствие

Таблица 3

Параметры	Вмещающий массив	Структурные нарушения
Модуль Юнга E, МПа	10^5	10^4
Коэфф. Пуассона ν	0.2	0.4
Удельный вес γ, т/м^3	3	3

Таблица 4

Ранг	Мощность, м	Расстояние между структурами, м	Прочностные характеристики по поверхности структурной неоднородности		Примечания
			Сцепление, МПа	Угол внутреннего трения, град	
I	100	-	0	24	Крупные единичные структуры
II	0.1	100	0.15	30	

наличия трещин II ранга, для остального массива также использовалась многослойная модель, которая позволяет учитывать от 1-го до 3-х направлений ослабленных слоев.

После обработки данных были получены результаты, отражающие реальное напряженно-де-формированное состояние в прикарьерной области массива пород. На рис. 5 показано распределение абсолютных перемещений и максимальных главных напряжений в окрестности карьера. Максимальные значения абсолютных перемещений составили 11.4 см.

Для оценки устойчивости был выполнен расчет коэффициента запаса. Анализ показал, что коэффициент запаса $k = 2.1$.

Картины распределения перемещений по вертикальным сечениям «север-юг» и «запад-восток» в момент, предшествующий разрушению, приведены на рис. 6.

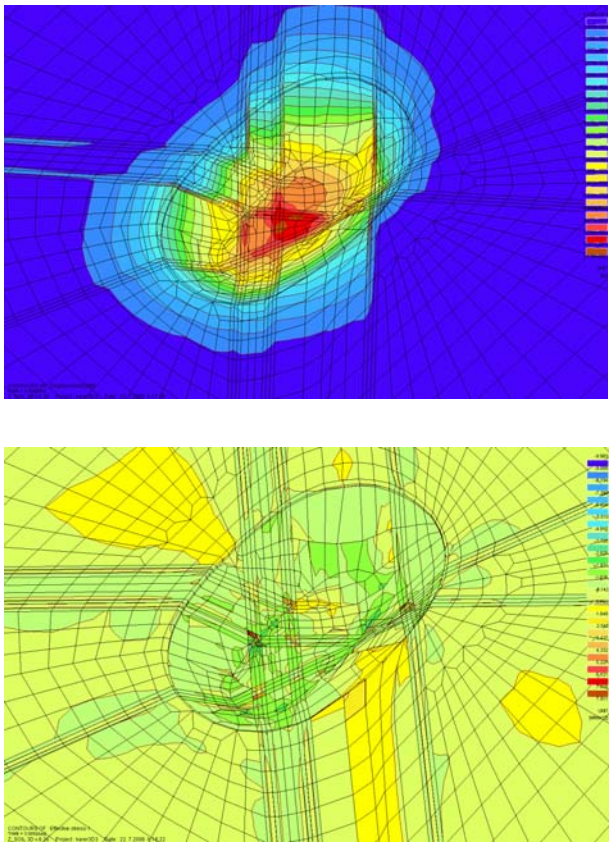

Рис. 5. Распределение абсолютных перемещений и максимальных главных напряжений

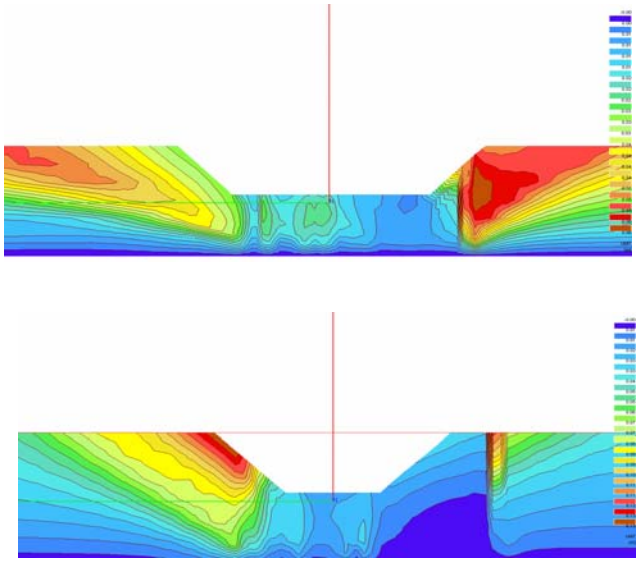

Рис. 6. Сечение «север-юг» и «запад-восток». Распределение абсолютных перемещений при k=2

Для возможности сравнения предложенного метода моделирования трещиноватых массивов, примененного в данной задаче, выполнен численный анализ напряженно-дефор-мированного состояния окрестности рассматриваемого карьера в упругой постановке. Применение упругой модели материала не предполагает учет влияния нарушений сплошности II ранга.

Сравнение полученных результатов показало, что зона влияния карьерной выемки при решении задачи в упругой постановке выше, чем при использовании упруго-пластической модели. Максимальное значение абсолютных перемещений составило 19.2 см. Таким образом, можно сделать вывод о неприменимости упругой модели даже к массивам крепких кристаллических скальных пород при наличии в них структурных нарушений и необходимости использования для таких случаев сложных упруго-пластических моделей среды.

Заключение

Сложность напряженно-деформированного состояния трещиноватых скальных пород требует особого подхода к исследованию поведения массива в каждом отдельном случае. В статье рассматривается новый подход к численному моделированию массивов, рассеченных заполненными трещинами с некоторой шириной раскрытия. Представление трещины и ослабленной зоны оперения в виде слоя конечных элементов, с использованием многослойной модели среды показало хорошее совпадение результатов с данными независимых лабораторных исследований. Это подтверждает работоспособность предложенной модели трещиноватого массива. Практическое применение нового подхода выполнено на примере анализа НДС окрестности карьерной выемки, расположенной в зоне пересечения крупных разломов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Власов А.Н.* Определение эффективных деформационных характеристик слоистых и трещиноватых скальных пород. – Автореферат дисс… к.т.н. – М.: МИСИ, 1990.
2. *Мор О.* Чем обусловлены предел упругости и временное сопротивление материала? – В кн. : Новые идеи в технике. Сборник №1. Теория прочности. – Петроград: Образование. 1915. – с. 1-50.
3. *Рац. М.В.* Структурные модели в инженерной геологии. – М.: Недра, 1973, 216 с.

4. *Руппенейт К.В.* Деформируемость массивов трещиноватых горных пород. – М.: Недра, 1975.

5. *Ухов С.Б.* Скальные основания гидротехнических сооружений. – М.: Энергия, 264с., 1975.

6. *Commend S., Truty A., Zimmermann T.* Numerical simulation of failure in elastoplastic layered media: theory and applications. LSC-DGC-EPFL, report 1996-S1 (unpublished).

7. *Goodman R.E., Taylor R.L., Brekke T.L.* A model for the mechanics of jointed rock. Proc. ASCE. Vol. 94. No. EM3, 1968.

8. *Hoek E. & Brown E.T.* Underground excavation in rock. Institution of Mining and Metallurgy, 1980, U.K.

9. *Singh M., Rao K.S. & Rammamurthy T.* Strength and deformation behaviour of a jointed rock mass**.** Rock Mech. and Rock Engng. (2002) 35 (1), 45-64

10. *Zienkiewicz O.C., Pande G.N.* Time dependent multi-laminate model of rocks—a numerical study of deformation and failure of rock masses. Int J Num Anal Meth Geomech 1977; 1:219–47

11. *Z_Soil 2006.* User Manual. Zace Services Ltd Report 1985-2006. Lausanne: Elmepress International. ГИАБ

Коротко об авторах

Юфин С.А., Ламонина Е.В. – Московский государственный строительный университет.

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 4 симпозиума «Неделя горняка-2007». Рецензент д-р техн. наук, проф. *С.А. Гончаров.*

ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	*Название работы*	*Специальность*	*Ученая степень*
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ им. Г.В. ПЛЕХАНОВА			
ПАНКРАТОВА Мария Юрьевна	Снижение воздействия технологических вод горнодобывающих предприятий на природную среду	25.00.36	к.т.н.