Горное дело
Mining

УДК 622.831

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РУДНОМ МАССИВЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ ФИЗИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНОГО ТЕЛА

А.Г.ПРОТОСЕНЯ, *д-р техн. наук, профессор, kaf-sgp@mail.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия

Целью работы является разработка метода прогноза напряженного состояния рудного массива вокруг выработок для руд слабых и средней прочности. Приведены экспериментальные исследования деформирования на прессовом оборудовании образцов руд малой и средней прочности в условиях объемных напряженных состояний. Для описания процесса деформирования рудного массива использована модель физически нелинейного тела. Выполнены исследования напряженного состояния физически нелинейного рудного массива вокруг выработок кругового и сводчатого поперечных сечений. Найдены значения коэффициентов концентрации тангенциальных напряжений на контуре выработок, сооружаемых в рудах различных типов. Рассмотрены решения физически нелинейных задач в подготовительных выработках при разработке Яковлевского месторождения богатых железных руд слоевой системой разработки. Методы прогноза напряженного состояния массива вокруг выработок могут быть использованы для оценки их устойчивости при разработке руд малой и средней прочности Яковлевского железорудного месторождения и в породных и грунтовых массивах.

Ключевые слова: рудный массив, напряжение, деформация, физическая нелинейность, выработка, устойчивость.

Результаты фундаментальных экспериментальных исследований прочности и деформирования различных типов горных пород в условиях объемных напряженных состояний при широкой вариации режимов и видов нагружения показаны в изданных работах [1, 2]. Получены полные диаграммы зависимостей между инвариантами напряжений и деформаций, включающие участки допредельного, предельного и запредельного состояний и остаточной прочности. Анализ результатов исследований показывает, что в условиях объемных напряженных состояний все горные породы склонны к проявлению пластических свойств. Похожие результаты экспериментальных исследований горных пород приведены в зарубежных работах [3, 4].

Характер деформирования горных пород и руд зависит от вида и скорости нагружения, типа и прочности породы. Вместе с тем, в настоящее время на практике при геомеханических расчетах получила распространение модель упруго-пластического тела. При этом предполагается, что руды и породы до предела прочности деформируются упруго. Данная модель может быть использована для описания процессов деформирования прочных пород и руд с пределом прочности на одноосное сжатие $\sigma_{сж} = 90$ МПа и более, когда между напряжениями и деформациями имеется линейная зависимость. При меньших значениях предела прочности $\sigma_{сж}$ зависимость между напряжениями и деформациями в допредельной области будет нелинейной.

Все горные породы по прочности подразделяются на породы малой, средней и большой прочности. В данной работе приняты к рассмотрению руды малой и средней прочности.

Экспериментальные исследования руд проводились на прессовом оборудовании в условиях объемных напряженных состояний по методике, приведенной в работах [1, 2]. Для испытаний были приняты руды Яковлевского железорудного месторождения, обобщенные характеристики которых приведены в табл.1. В числителе стоит интервал изменения величины, а в знаменателе среднее значение. Из данных табл.1 следует, что пределы прочности на одноосное сжатие $\sigma_{сж}$ и растяжение $\sigma_р$ руд малой и средней прочности находятся в интервалах 6,37 и 29,77 МПа для $\sigma_{сж}$ и 1,31 и 5,99 МПа для $\sigma_р$.

Таблица 1

Обобщенные показатели свойств руд и вмещающих пород Яковлевского железорудного месторождения

Наименование пород и руд	Удельный вес $\gamma \cdot 10^4$, Н/м^3	Объемная масса $\gamma_о \cdot 10^3$, кг/м^3	Пористость n, %	Угол внутреннего трения, град.	Удельное сцепление C, МПа	$\sigma_{сж}$, МПа	$\sigma_р$, МПа	Модуль упругости $E \cdot 10^{10}$, Па	Коэффициент Пуассона
Руда хлорит-лимонит-мартитовая, среднеблочная, плотная	3,25-4,70 3,77	2,73-3,53 3,13	3,08-24,90 15,70	41-43 42	2,30-17,00 9,22	10,23-41,76 29,77	1,83-8,42 5,99	1,64-2,50 2,07	0,27
Руда гидрогематит-мартитовая, тонкозернистая, крепкая	4,29-5,12 4,70	3,01-3,84 3,42	15,8-29,5 22,65	35-42 39	2,51-7,00 4,78	7,80-31,94 20,63	1,71-6,28 4,00	2,2-3,0 2,6	0,20-0,22 0,21
Руда мартит-железнослюдковая, рыхлая	2,98-5,01 4,38	2,73-3,90 3,34	8,32-29,9 21,4	27-38 34	0,17-0,40 0,28	0,62-1,70 1,10	0,17-0,41 0,27	1,3	
Руда железнослюдково-мартитовая, хлоритизированная	4,38-5,01 4,70	3,31-3,67 3,49	24,4-26,7 25,6	36-44 40	1,65-1,67 1,66	6,35-6,39 6,37	0,99-1,64 1,31	1,9-4,5 3,2	0,17-0,24 0,20
Руда железнослюдково-мартитовая, карбонатизированная, плотная	4,47-4,90 4,68	3,15-3,63 3,38	25,9-29,4 27,8	42-43 42	3,51-7,20 5,32	15,81-23,53 18,66	2,54-4,82 3,48	3,10-3,92 3,52	0,25-0,30 0,27
Сланцы хлорит-серицитовые, железистые	3,20-4,21 3,72	2,88-3,12 3,00	10,0-28,5 23,0	34-42 37	5,20-11,70 9,17	19,9-50,20 37,27	5,34-11,16 8,71	2,80-2,95 2,90	0,15-0,30 0,22
Железистые кварциты мартит-железнослюдковые	3,85-4,02 3,92	3,13-3,55 3,40	9,0-18,2 14,8	38-41 39,6	12,46-27,80 17,35	55,49-121,3 76,44	11,53-24,50 15,57	6,0-14,1 11,3	0,21-0,28 0,23

Мартит-железнослюдковая рыхлая руда по своим прочностным характеристикам близка к грунтам. Экспериментальные исследования проводились для всех типов руд, представленных в табл.1, за исключением мартит-железнослюдковой рыхлой. Испытания проводились по схеме нагружения Кармана $(\sigma_1 \geq \sigma_2 = \sigma_3)$, для всех типов руд были получены напряжения σ_1 и деформации ε_1, ε_2 (рис.1). Здесь $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения, ε_1, ε_2 – главные относительные деформации. Для каждого типа руд были построены экспериментальные зависимости между наибольшим сдвигом $\gamma = \varepsilon_1 - \varepsilon_3$ и наибольшим касательным напряжением $\tau = 0{,}5(\sigma_1 - \sigma_3)$ (рис.2).

На рис.1 и 2 приведены экспериментальные зависимости для железнослюдково-мартитовой руды. Для других испытанных типов характер деформирования аналогичный.

Анализ результатов исследований (рис.1) показал, что крайняя правая точка зависимости $\sigma_1 - \varepsilon_1$ соответствует ее наибольшему значению, т.е. пределу прочности на одноосное сжатие руды. При дальнейшем увеличении σ_1 процесс деформирования образца переходит в запредельную область с последующим его разрушением.

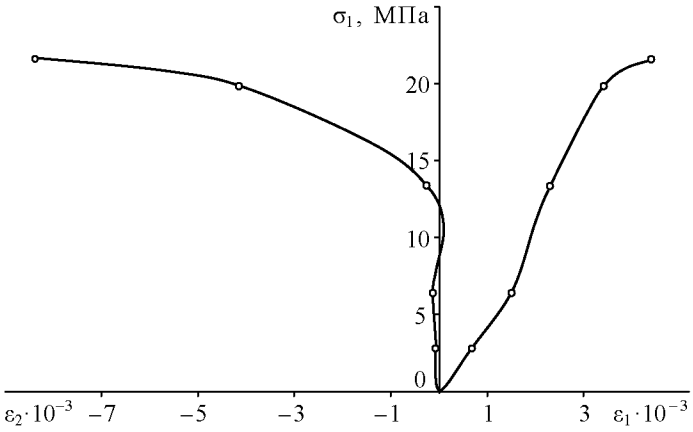


Рис.1. Экспериментальная зависимость между напряжениями и деформациями железнослюдково-мартитовой руды

В допредельной области зависимость между τ и γ, как следует из результатов экспериментальных данных, является нелинейной функцией наибольшего сдвига.

Для описания процессов деформирования руд малой и средней прочности в допредельной области можно использовать уравнения деформационной теории пластичности [1]

$$\varepsilon_x - \frac{1}{3}\varepsilon = \varphi(\sigma_x - \sigma);\ \gamma_{yz} = 2\varphi\tau_{yz};$$

$$\varepsilon_y - \frac{1}{3}\varepsilon = \varphi(\sigma_y - \sigma);\ \gamma_{yz} = 2\varphi\tau_{yz}; \quad (1)$$

$$\varepsilon_z - \frac{1}{3}\varepsilon = \varphi(\sigma_z - \sigma);\ \gamma_{xy} = 2\varphi\tau_{xy},$$

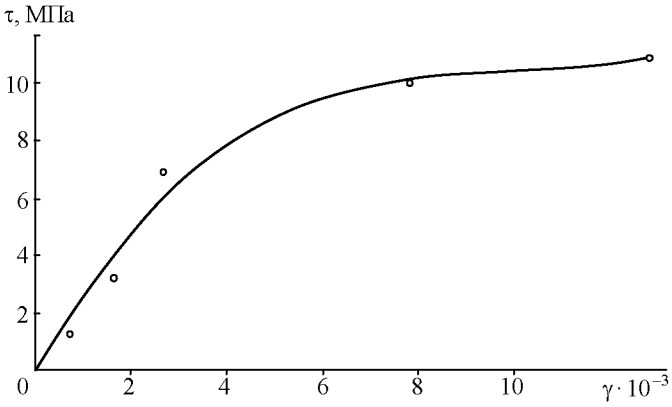


Рис.2. Зависимость между наибольшим сдвигом и наибольшим касательным напряжением

где $\varepsilon = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$; $\sigma = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)$; $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – соответственно компоненты относительных деформаций и напряжений в направлении осей x, y, z; γ_{yz}, γ_{xz}, γ_{xy} – компоненты деформаций сдвига.

Неизвестную функцию φ можно определить, используя экспериментальные данные между инвариантами девиаторов напряжений и деформаций. Для установления связи между инвариантами может быть использована степенная, параболическая и другие виды зависимостей.

Анализ экспериментальных данных деформирования руд (рис.2) показывает, что зависимость между максимальным касательным напряжением и наибольшим сдвигом может быть описана зависимостью

$$\tau = B\gamma^{\frac{1}{m+1}}, \quad (2)$$

где B, m – постоянные.

Из уравнений (1) следует, что

$$\varphi = \frac{\gamma}{2\tau}. \quad (3)$$

В работе [2] исследовано напряженно-деформированное состояние вокруг одиночной выработки за пределом упругости для основных форм поперечных сечений в физически нелинейном изотропном массиве, сооружаемом в массиве с начальным гидростатическим напряженным состоянием. В частности, радиальные и тангенциальные компоненты напряжений для выработки с поперечным сечением круглой формы имеют вид

$$\sigma_r = \gamma_0 H - \frac{\gamma_0 H - p}{r^{\frac{2}{1+m}}}; \quad \sigma_\theta = \gamma_0 H + \frac{1-m}{1+m}\frac{\gamma_0 H - p}{r^{\frac{2}{1+m}}}, \tag{4}$$

где $r = R/R_0$; p – отпор крепи; r – радиальная координата; R_0 – радиус выработки; γ_0 – средний удельный вес; H – глубина заложения выработки.

Коэффициент концентрации тангенциальных напряжений σ_θ на контуре выработки зависит от показателя m нелинейной связи между напряжениями и деформациями и вычисляется по формуле

$$K_\theta = \frac{2}{1+m} - \frac{1-m}{1+m}\frac{p}{\gamma_0 H}. \tag{5}$$

Проводился расчет напряжений σ_θ на контуре одиночной выработки круглой формы, сооружаемой в средах с различным показателем нелинейности. Для выработки, заложенной в известняке, с показателем нелинейности m = 0,163, получено значение тангенциальных напряжений на контуре $\sigma_\theta = 1{,}72\gamma_0 H$. Для выработки, сооружаемой в солях с сильной нелинейностью (m = 2,48), напряжения на контуре составили $\sigma_\theta = 0{,}57\gamma_0 H$. Таким образом, в первом случае использование упругой модели завышает коэффициент концентрации тангенциальных напряжений в 1,16, во втором – в 3,5 раза.

Значительный интерес представляет нахождение коэффициентов концентрации тангенциальных напряжений σ_θ на контуре выработки круглой формы, сооружаемой в различных типах железных руда Яковлевского месторождения, обладающих нелинейным характером деформирования.

Естественное напряженно-деформированное состояние массива определялось, исходя из того, что выработка расположены на глубине 500 м в гидростатическом поле напряжений, распределенных по всему объему вмещающего массива, с составляющими

$$\sigma_x = \sigma_y = \gamma_0 H.$$

Найдем коэффициенты концентрации напряжений σ_θ на контуре горных выработок в рудном физически нелинейном массиве с начальным гидростатическим напряженным состоянием. Рассмотрим вначале железнослюдково-мартитовую руду, коэффициент нелинейности m которой, как следует из экспериментальных данных (рис.2), равен 2,1. Величина коэффициента концентрации тангенциальных напряжений σ_θ при p = 0 равна 0,65, что меньше коэффициента концентрации напряжений, равного 2,0 для упругого массива в 3,07 раза.

Таким образом, учет физической нелинейности рудного массива позволит более объективно, по сравнению с теорией упругости, определить напряженное состояние около выработки и оценку ее устойчивости.

Для других типов руд величины коэффициентов концентрации тангенциальных напряжений σ_θ на контуре выработки круговой формы при p = 0 и начальном гидростатическом напряженном состоянии приведены в табл.2.

При анализе полученных данных установлено, что для выработки, сооружаемой в железнослюдково-мартитовых и гидрогематитовых рудах средней прочности, напряжения на контуре согласно физически нелинейной теории составили $\sigma_\theta = 0{,}98\,\gamma_0 H$ и $\sigma_\theta = 0{,}62\,\gamma_0 H$ соответственно. Таким образом, использование теории упругости в первом случае завышает коэффициент концентрации напряжений в 2,04, во втором – в 3,23 раза.

Таблица 2

Коэффициенты концентрации тангенциальных напряжений σ_θ на контуре выработки круглой формы

Руда	Коэффициент концентрации напряжений σ_θ на контуре в долях $\gamma_0 H$ по теории		Коэффициент увеличения напряжений по линейной теории по сравнению с нелинейной
	линейной	нелинейной	
Железнослюдково-мартитовая руда			
Хлоритизированная, средней прочности	2	0,98	2,04
Карбонатизированная	2	0,65	3,07
Гидрогематитовая руда			
Хлоритизированная, средней прочности	2	0,62	3,23
Карбонатизированная, прочная	2	1,18	1,69
Мартитовая руда			
Скальная	2	1,97	1,01

Характер распределения коэффициента концентрации тангенциальных напряжений в окрестности выработки круглой формы в железнослюдково-мартитовой руде представлен на рис.3. Анализ результатов расчета показывает, что распределение напряжений σ_θ для нелинейной среды более равномерное, при этом зона влияния выработки является большей.

Для нахождения коэффициентов концентрации тангенциальных напряжений на контуре одиночной подготовительной выработки сводчатой формы с учетом физически нелинейной модели деформирования железорудного массива построена двумерная конечно-элементная модель.

Естественное напряженно-деформированное состояние массива определялось, исходя из того, что выработки расположены на глубине 500 м в неравнокомпонентном поле напряжений, распределенных по всему объему вмещающего массива с составляющими $\sigma_y = \gamma_0 H$, $\sigma_x = 0{,}33\gamma_0 H$.

В результате моделирования получены значения коэффициентов концентрации тангенциальных напряжений на контуре выработки сводчатой формы (табл.3). Характер распределения коэффициента концентрации тангенциальных напряжений на контуре выработки сводчатой формы представлен на рис.4.

При анализе полученных в ходе моделирования данных установлено, что для выработки, сооружаемой в железнослюдково-мартитовых и гидрогематитовых рудах средней прочности, максимальные напряжения на контуре согласно нелинейной теории составили $\sigma_\theta = 1{,}84\gamma_0 H$ и $\sigma_\theta = 1{,}72\gamma_0 H$ соответственно.

Наибольшие значения коэффициентов концентрации в первом случае отмечены на уровне пяты свода, во втором – на уровне почвы выработки. На уровне пяты свода в первом случае теория упругости завышает коэффициент концентрации тангенциальных напряжений в 1,64 раза, а во втором – в 1,9 раза.

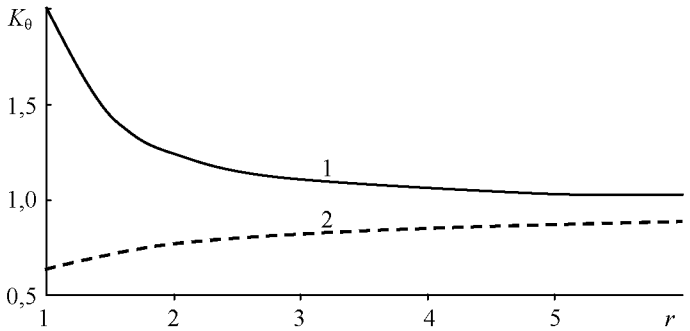


Рис.3. Распределение коэффициента концентрации тангенциальных напряжений K_θ в окрестности выработки круглой формы для железнослюдково-мартитовой руды средней прочности
1 – линейная постановка; 2 – нелинейная

Таблица 3

Коэффициенты концентрации тангенциальных напряжений σ_θ на контуре выработки сводчатой формы

Участок контура	Коэффициент концентрации напряжений σ_θ на контуре в долях $\gamma_0 H$ по теории		Коэффициент увеличения напряжений по линейной теории по сравнению с нелинейной
	линейной	нелинейной	
Руда железнослюдково-мартитовая хлоритизированная, средней прочности			
Кровля	0,78	0,86	0,91
Пята свода	3,01	1,84	1,64
Бок	1,54	0,90	1,71
Почва	2,52	1,65	1,53
Карбонатизированная, плотная			
Кровля	0,78	0,78	1,0
Пята свода	3,01	2,35	1,28
Бок	1,54	1,37	1,12
Почва	2,52	1,67	1,51
Руда гидрогематитовая хлоритизированная, средней прочности			
Кровля	0,78	0,80	0,98
Пята свода	3,01	1,58	1,90
Бок	1,54	0,81	1,90
Почва	2,52	1,72	1,47
Карбонатизированная, плотная			
Кровля	0,78	0,70	1,11
Пята свода	3,01	1,93	1,55
Бок	1,54	1,08	1,43
Почва	2,52	1,47	1,71

На уровне почвы для выработки, сооружаемой в железнослюдково-мартитовой руде средней прочности, коэффициент превышения напряжений составил 1,53, в гидрогематитовой руде средней прочности – 1,47.

Для оценки коэффициента концентрации напряжений σ_θ на контуре подготовительной выработки в зоне влияния очистных работ в качестве объекта моделирования был выбран блок № 6 Яковлевского рудника. Проходка горных выработок на участке проводится в железнослюдково-мартитовых рудах и сопровождается интенсивным проявлением горного давления. Модель строилась с учетом плана горных работ на руднике. Моделирование выполнено в постановке плоской деформации. Реальный массив рассматривался как сплошная изотропная среда и заменялся весомой конечной областью шириной 1300 м и высотой 200 м. Размеры модели подбирались с учетом исключения влияния граничных условий на распределение напряжений и деформаций вокруг выработок (рис.5).

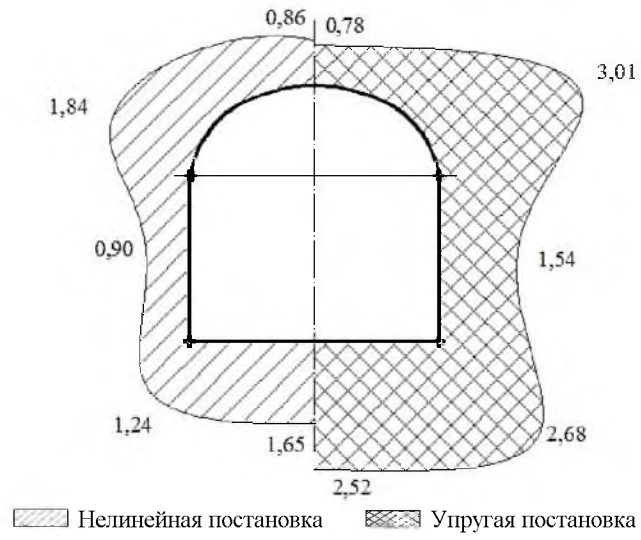


Рис.4. Распределение коэффициента концентрации тангенциальных напряжений K_θ на контуре выработки сводчатой формы для железнослюдково-мартитовой руды средней прочности

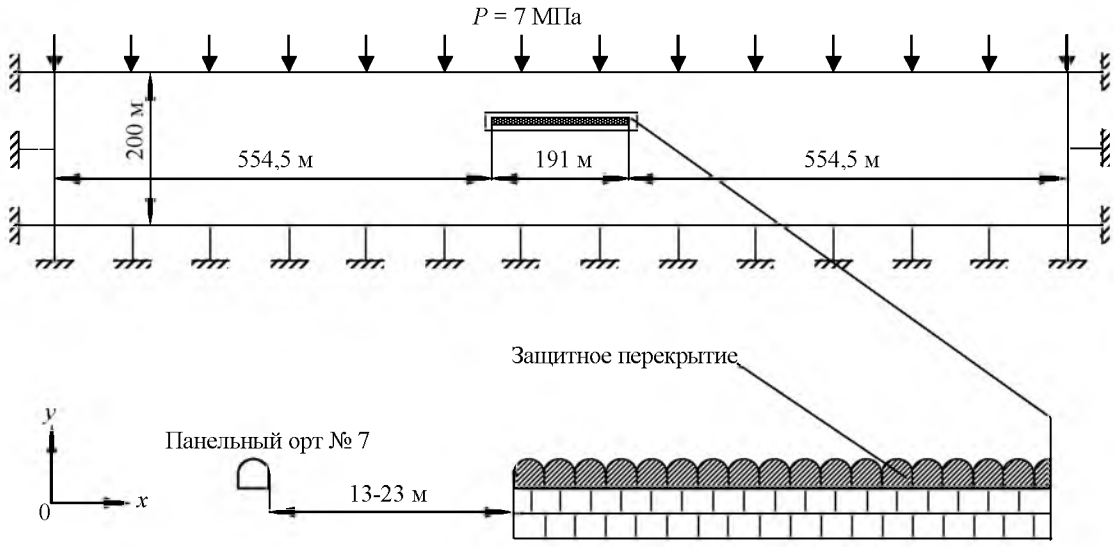


Рис.5. Принципиальная схема конечно-элементной модели

Выбран способ задания граничных условий, при котором в модели запрещались смещения по боковым граням области в направлении оси *x*, по нижней грани – по оси *y*, верхняя грань модели оставалась свободно деформируемой. Почва выработок защитного перекрытия расположена от верхней грани модели на глубине 65 м, что соответствует размеру рудной толщи над верхним слоем (предохранительный рудный целик).

Естественное напряженно-деформированное состояние массива задавалось вертикальными напряжениями $\sigma_y = 7$ МПа, приложенными к верхней грани конечно-элементной модели. Величина вертикальных напряжений принята в соответствии с ранее проведенными расчетами напряженно-деформированного состояния неоднородного рудного массива.

В модели рудный массив заменялся нелинейно-деформируемой средой с физико-механическими характеристиками железнослюдково-мартитовой руды средней прочности: модулем деформации $E = 2{,}6 \cdot 10^3$ МПа, коэффициентом Пуассона $\nu = 0{,}25$. Нелинейный характер деформирования задавался на основании результатов испытаний образцов железнослюдково-мартитовой руды на прессовом оборудовании (см. рис.1). Характеристики закладочного материала: $E = 2{,}6 \cdot 10^3$ МПа, $\nu = 0{,}25$.

Дискретизация расчетной области модели реализована таким образом, что минимальный геометрический размер конечного элемента составил 0,1 м на контуре выработки по мере удаления от выработки увеличивался. Таким образом было реализовано сгущение сетки конечных элементов в окрестности проводимых выработок. В качестве используемого типа конечных элементов выбраны плоские четырехузловые конечные элементы первого порядка. Общее количество элементов составляет 77 079. Недозаклад каждой из очистных заходок моделировался созданием пустот в кровле размером 40 см.

Для качественной оценки напряженно-деформированного состояния рудного массива в результате расчетов получены закономерности изменения коэффициента концентрации вертикальных напряжений.

На рис.6 показано распределение коэффициента концентрации вертикальных напряжений на контуре и в окрестности одиночной подготовительной выработки в зависимости от этапа проходки и расстояния до границы зоны очистных работ для упругой и физически нелинейной постановки. Этап 1 соответствует моменту проходки подготовительной выработки; этап 2 – проходке и полной закладке выработок защитного перекрытия с недозакладом 0,4 м; этап 3 – проходке и полной закладке очистных выработок первого слоя; этап 4 – проходке и полной закладке очистных выработок второго слоя.

Установлено, что наибольшая интенсивность коэффициента концентрации вертикальных напряжений K_y прослеживается в боках выработки. В табл.4 представлен характер изменения максимального коэффициента концентрации вертикальных напряжений в боках подготовительной выработки в зависимости от расстояния до границы зоны очистных работ в закладочном массиве и этапа ведения очистных работ. В числителе указаны коэффициенты концентрации, полученные согласно теории упругости, в знаменателе – согласно физически нелинейной теории.

Таблица 4

Сравнение коэффициентов концентрации вертикальных напряжений в боках одиночной подготовительной выработки сводчатого сечения по линейной и нелинейной теории

Этап очистных работ	Коэффициент концентрации вертикальных напряжений	
	Левый бок выработки	Правый бок выработки
23 м от зоны очистных работ в закладочном массиве		
Этап 1	1,71/1,32	1,69/1,11
Этап 2	1,84/1,33	1,73/1,39
Этап 3	1,89/1,34	1,84/1,48
Этап 4	1,94/1,36	1,92/1,57
13 м от зоны очистных работ в закладочном массиве		
Этап 1	1,74/1,30	1,74/1,38
Этап 2	1,91/1,34	1,90/1,39
Этап 3	1,97/1,35	1,94/1,39
Этап 4	2,05/1,36	2,03/1,39

Отмечено, что при удалении от границы зоны очистных работ на расстояние 23 м на первом этапе моделирования $K_y = 1{,}71$ для теории упругости и $K_y = 1{,}32$ для физически нелинейной теории (табл.4). По мере возрастающего влияния очистных и закладочных работ в ходе последующих этапов наблюдается возрастание K_y до 1,94 для теории упругости и K_y до 1,36 для физически нелинейной теории.

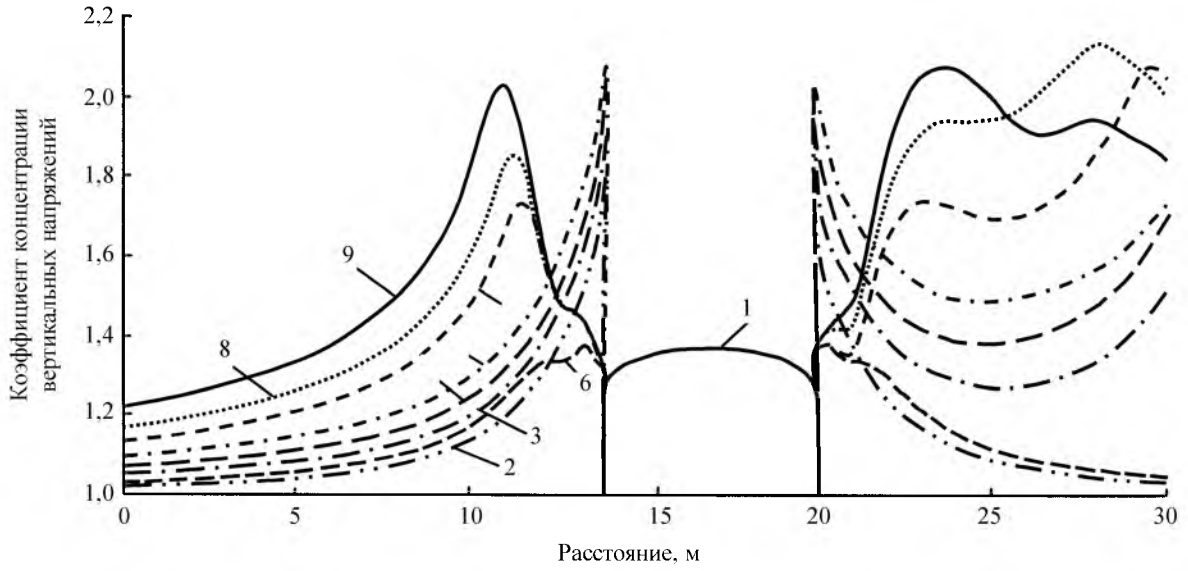


Рис.6. Распределение коэффициента концентрации вертикальных напряжений на контуре 1 и в окрестности подготовительной выработки, расположенной на расстоянии 13 м от зоны очистных работ, в упругой постановке: 2 – этап 1; 3 – этап 2; 4 – этап 3; 5 – этап 4; в нелинейной постановке: 6 – этап 1; 7 – этап 2; 8 – этап 3; 9 – этап 4

С уменьшением расстояния от подготовительной выработки до границы зоны очистных работ в закладочном массиве до 13 м наблюдается незначительный рост K_y в боках выработки. По мере приближения к границе зоны K_y скачкообразно увеличивается, что объясняется непосредственной близостью зоны ведения очистных и закладочных работ (рис.6).

Установлено, что учет физической нелинейности деформационных свойств рудного массива приводит к снижению наибольшей концентрации вертикальных напряжений на контуре и в окрестности выработки сводчатого сечения в 1,3-1,5 раза. Полученные закономерности изменения коэффициента концентрации вертикальных напряжений необходимо учитывать в расчетах устойчивости подготовительных выработок, а также при разработке рекомендаций по креплению подготовительных выработок в железорудном массиве.

Выводы

Выполнены экспериментальные исследования на прессовом оборудовании образцов руд малой и средней прочности в условиях объемного напряженного состояния, для описания процессов деформирования которых обосновано использование уравнений деформационной теории пластичности.

Исследовано напряженное состояние вокруг одиночных выработок в физически нелинейном рудном массиве, установлены величины снижения коэффициентов концентрации тангенциальных напряжений на контуре выработок для физически нелинейного массива.

Около подготовительной выработки, применительно к условиям Яковлевского рудника, для линейного и нелинейного массивов исследована концентрация вертикальных напряжений в боках при слоевой системе разработки железных руд с закладкой выработанного пространства.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ставрогин А.Н.* Пластичность горных пород / А.Н.Ставрогин, А.Г.Протосеня. М.: Недра 1979. 301 с.

2. *Ставрогин А.Н.* Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах / А.Н.Ставрогин, А.Г.Протосеня. М.: Недра, 1985. 271 с.

3. *Tshibangu J.-P., Descamps F.* The GPMs (UMons-Belgium) device for investigating the mechanical behavior pf meterials subjected to true triaxial compression. Geomechanics Research Series. Volume 4. True triaxial testing of rocks. Editors: CRC Press/Balkema, Taylor&Francis Group. 2012, p.51-60.

4. *Mogi K.* Haw I developed a true triaxial rock testing mashine. Geomechanics Research Series Volume 4. True triaxial testing of rocks. Editors: CRC Press/Balkema, Taylor&Francis Group. 2012, p.139-157.

REFERENCES

1. *Stavrogin A.N., Protosenya A.G.* Plastichnost gornykh porod (*Plasticity of Rocks*). Moskow: Nedra, 1979, p.301.

2. *Stavrogin A.N., Protosenya A.G.* Prochnost gornykh porod i ustoichivost na bolshikh glubinakh (*The strength and stability of rock workings at great depths*). Moskow: Nedra, 1985, p.271.

3. *Tshibangu J.-P., Descamps F.* The GPMs (UMons-Belgium) device for investigating the mechanical behavior pf meterials subjected to true triaxial compression. Geomechanics Research Series. Volume 4. True triaxial testing of rocks. Editors: CRC Press/Balkema, Taylor&Francis Group. 2012, p.51-60.

4. *Mogi K.* Haw I developed a true triaxial rock testing mashine. Geomechanics Research Series Volume 4. True triaxial testing of rocks. Editors: CRC Press/Balkema, Taylor&Francis Group. 2012, p.139-157.

MODELING OF GEOMECHANICAL PROCESSES IN ORE MASS USING PHYSICALLY NONLINEAR MODEL

A.G.PROTOSENYA, *Dr. of Engineering Sciences, Professor, kaf-sgp@mail.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), St Petersburg, Russia

The aim of the article is to develop a method of forecasting the state of stress of the ore mass around excavations for ores of weak and medium strength. The paper presents experimental studies on the deformation of ore samples of low and medium strength in the forging equipment in conditions of volume stress state. A physically nonlinear model is used to describe the deformation process of ore mass. The study of the stress state of physically nonlinear ore mass around excavations of round and valuated cross-sections is performed. Values of coefficients of tangential stress concentrations on excavation contour are found for different types of ore. Solutions to physically nonlinear problems in preparatory excavations in the development of the Yakovlevskiy deposit of rich iron ore using a slicing method are considered. Methods for forecasting the stress state in rock mass around mine excavations can be used to assess their stability in the mining of ore of low and medium strength at the Yakovlevskiy iron ore deposit and in the rock and soil masses.

Key words: ore mass, stress, strain, physical nonlinearity, excavations, stability.