УДК 622.284

А.Г.ПРОТОСЕНЯ, *д-р техн. наук, профессор, kaf-sgp@mail.ru*
В.И.СЕМЁНОВ, *аспирант, vi.semenov@bk.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

A.G.PROTOSENYA, *Dr. in eng. sc., professor, kaf-sgp@mail.ru*
V.I.SEMYONOV, *post-graduate student, vi.semenov@bk.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРУЕМОГО СОСТОЯНИЯ ВОКРУГ ОДИНОЧНОЙ ВЫРАБОТКИ ПРИ ФИЗИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ ГОРНЫХ ПОРОД

Приведен сравнительный анализ напряженно-деформируемого состояния на контуре и в окрестности одиночной выработки круглого и сводчатого очертаний при упругой и нелинейной диаграмме деформирования различных типов горных пород.

Методом конечных элементов получен ряд графических зависимостей, отражающих характер напряженно-деформируемого состояния. Установлены реальные значения коэффициентов концентрации тангенциальных напряжений на контуре выработки при использовании нелинейных зависимостей.

Ключевые слова: деформация, напряжения, коэффициент концентрации, нелинейность.

ASSESSMENT OF STRESS-STRAIN CONDITIONS AROUND SINGLE DEVELOPMENT WITH NONLINEAR ROCK-MASS DEFORMATION

The comparative analysis of the stress-strain state in the circuit and in the vicinity of a single generation of circular and arched curves of elastic and non-linear strain diagram types of rocks.

Graphic dependences were obtained by the finite element method, reflecting the nature of the stress-strain state.

The actual values of the tangential stress concentration factor on the circuit were obtained using non-linear functions.

Key words: deformation, stress concentration factor, nonlinearity.

В настоящее время для описания напряженно-деформируемого состояния горных пород широкое распространение получила модель упругого тела. Данная модель является простейшей и применяется наиболее часто. Она представляет собой линейно деформируемую среду, т.е. среду, в которой напряжения и деформации связаны линейными зависимостями.

При высоком уровне касательных напряжений горные породы имеют нелинейную зависимость между напряжениями и деформациями.

С точки зрения практики, наибольший интерес представляет определение концентрации тангенциальных напряжений на контуре выработки с использованием нелинейных зависимостей. Это позволяет оценить

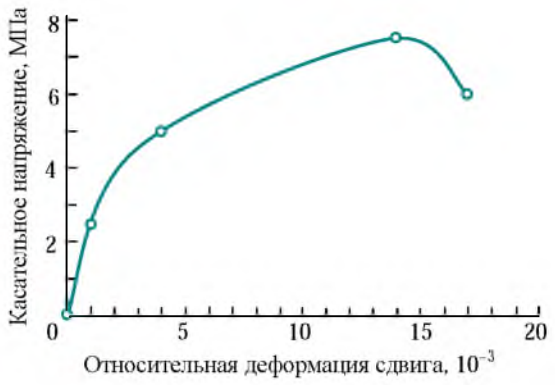


Рис.1. Усредненная диаграмма изменения сопротивления сдвигу железно-слюдково-мартитовой руды в зависимости от деформации сдвига при боковой нагрузке 2 МПа

область применимости модели упругого тела, найти реальные значения коэффициентов концентрации напряжений на основе нелинейной диаграммы между напряжениями и деформациями, что дает возможность, в конечном итоге, снижая значения коэффициентов, снизить затраты на обеспечение устойчивости горных выработок*.

В качестве исходных данных для анализа приняты результаты экспериментальных исследований прочностных и деформационных характеристик различных типов руд Яковлевского месторождения в условиях объемного напряженного состояния, проведенные на образцах с естественной влажностью (рис.1).

Анализ экспериментальных данных о деформировании пород в условиях объемного напряженного состояния показывает, что зависимость между наибольшим сдвигом γ и максимальным касательным напряжением τ может быть описана выражением**

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

где B и m – постоянные.

Нормальные радиальные и тангенциальные напряжения на контуре выработки могут быть описаны зависимостями соответственно

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

где γH – начальное гидростатическое напряженное состояние; p – нагрузка; r – радиальная координата.

Коэффициент концентрации напряжений на контуре выработки зависит от показателя m нелинейности связи между напряжениями и деформациями:

$$K = \frac{\sigma_\theta}{\gamma H} = \frac{2}{1+m}. \qquad (2)$$

Показатели нелинейности B и m для железно-слюдково-мартитовой руды найдем, используя зависимость (1) и данные экспериментальной диаграммы.

В упомянутой работе получено решение физически нелинейной задачи о напряженном состоянии массива вокруг выработки кругового очертания.

Используя зависимость (2), найдем нормальные тангенциальные напряжения на контуре выработки $\sigma = 0{,}81\gamma H$.

Таким образом, исходя из начального гидростатического напряженного состояния $\gamma H = 13$ МПа, получим нормальные тангенциальные напряжения на контуре выработки $\sigma_\sigma = 10{,}53$ МПа.

Проведение выработок с физической точки зрения можно представить как образование полости в массиве горных пород, обладающем определенными свойствами и начальным полем напряжений. При этом вокруг выработки формируется новое поле напряжений и смещений, которое можно представить как сумму начального поля напряжений и смещений нетронутого массива (т.е. до проведения выработки) и дополнительного поля напряжений и смещений, являющегося результатом выемки породы при проведении горных работ.

Задачи подобного рода обычно сводят к расчету напряжений вокруг сечения выработки в невесомом массиве с внешними, удаленными от центра выработки, границами, нагруженными напряжениями, действующими в нетронутом массиве в точке, которая соответствует центру сечения выработки. Такая расчетная схема отличается простотой и нагляд-

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

Stavrogin A.N., Protosenya A.G. Rock-mass strength and development's stability at a big depth. Moscow, 1985.

** Там же.

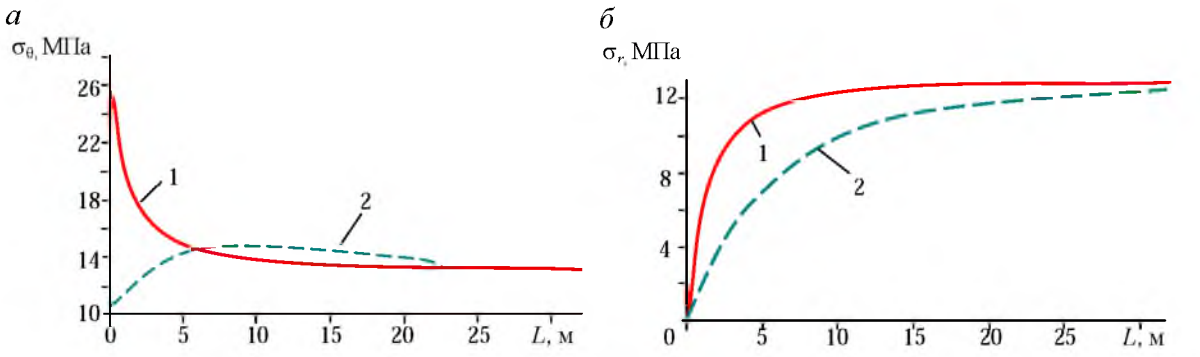


Рис.2. График зависимости нормальных тангенциальных (*а*) и радиальных (*б*) напряжений от расстояния до контура выработки *L*

1 – при упругой модели; 2 – при нелинейной модели

ностью и дает возможность достаточно точно оценить концентрацию напряжений в окрестности горной выработки.

Для исследования напряженного состояния вокруг выработки была составлена плоская конечно-элементная модель породного массива в программном комплексе SIMULIA ABAQUS. Модель представляет собой квадрат со стороной 380 м. Граничные условия задаются следующим образом: ко всем граням области прикладывается давление $P = \gamma H =$ = 13 МПа, создающее гидростатическое напряженное состояние. Горные породы смоделированы трехузловыми элементами типа CPE3 размером, варьирующимся от 2 м на краях модели до 0,1 м в окрестности выработки.

При построении модели использованы следующие значения физико-механических характеристик железно-слюдково-мартитовой руды: модуль упругости $E = 500$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0{,}25$, $\gamma = 34{,}4$ кН/м^3.

Нелинейность массива моделировалась заданием точек диаграммы изменения сопротивления сдвигу руды в зависимости от деформации сдвига, полученной экспериментально (рис.1). При решении поставленной задачи вначале исследовалось напряженное состояние по определенному направлению *S*, вокруг незакрепленной выработки кругового очертания, пройденной в изотропных линейно деформируемом и нелинейно деформируемом массивах.

По результатам описанных вычислений был построен ряд графических зависимостей. На рис.2 представлены эпюры распределения нормальных тангенциальных (σ_θ) и радиальных (σ_r) напряжений в окрестности одиночной выработки кругового очертания, пройденной по железно-слюдково-мартитовым рудам в упругой и нелинейной моделях массива.

Согласно результатам моделирования, для упругой постановки задачи нормальные тангенциальные напряжения максимальны на контуре выработки: $\sigma_\sigma = 26$ МПа (коэффициент концентрации $K = 2$).

Для нелинейной задачи максимальные значения нормальных тангенциальных напряжений на контуре выработки $\sigma_\sigma = 10{,}8$ МПа (коэффициент концентрации $K = 0{,}83$). Как

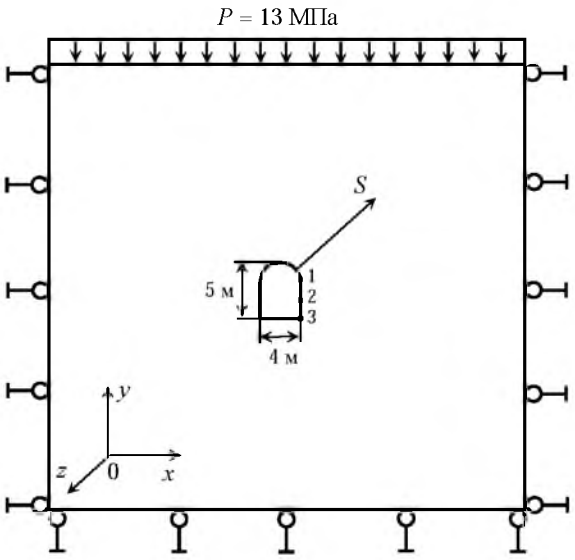


Рис.3. Расчетная схема

1, 2, 3 – точки на контуре выработки, для которых определялись наряжения

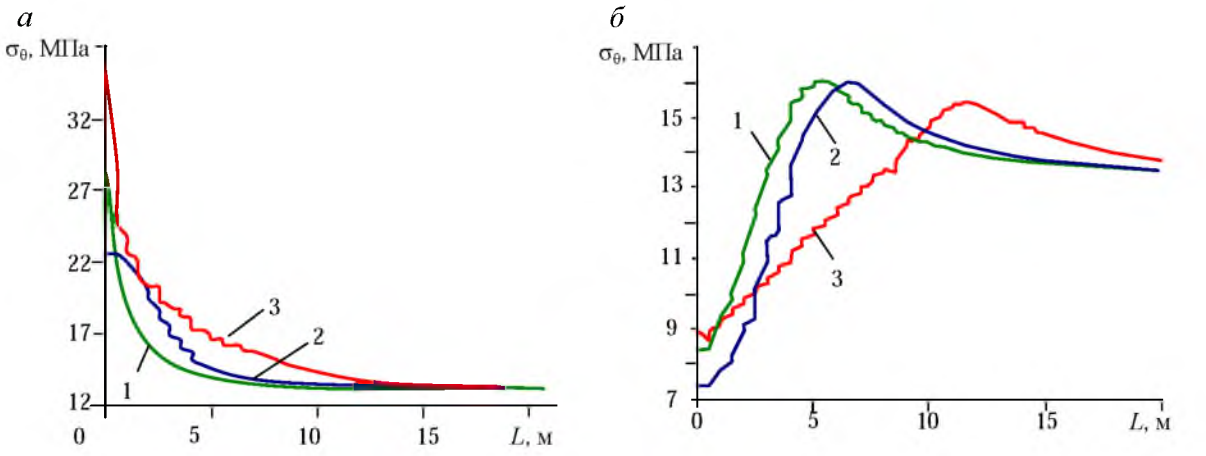


Рис.4. График зависимости нормальных тангенциальных напряжений от расстояния до контура выработки при упругой (*а*) и нелинейной (*б*) постановке задачи

1 – на уровне пяты свода выработки; 2 – в боку выработки; 3 – на уровне почвы выработки (см. рис.3)

видно из рис.3, нормальные тангенциальные напряжения максимальны на некотором удалении от контура выработки (около 5 м) и составляют $\sigma_{\theta max}$ = 14,5 МПа. Нормальные радиальные напряжения на контуре выработки равны нулю, а по мере удаления от контура стремятся к начальному напряженному состоянию $P = \gamma H$ = 13 МПа.

Результаты моделирования и аналитического расчета имеют достаточно высокую степень сопоставимости, что позволяет математическую модель считать адекватной реальной геомеханической обстановке и использовать ее для определения ожидаемых параметров напряженно-деформированного состояния в нелинейно деформируемой среде, а результаты моделирования полагать достоверными.

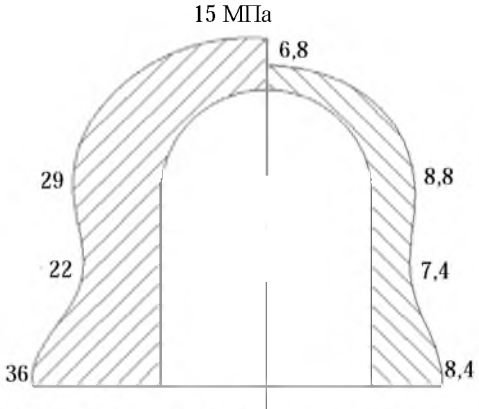


Рис.5. Эпюры нормальных тангенциальных напряжений на контуре выработки при упругой (слева) и нелинейной моделях массива (справа)

Рассмотрим теперь выработку сводчатого очертания, расположенную в рудном массиве, свойства которых описаны при решении задачи о выработке кругового очертания. Граничные условия задаются следующим образом: вышележащая породная толща (около 500 м) заменена адекватной равномерно-распределенной нагрузкой (13 МПа), боковым граням запрещены перемещения по горизонтальной оси, нижней – по вертикальной. Горные породы смоделированы трехузловыми элементами типа CPE3* размером от 2 м на краях модели до 0,1 м в окрестности выработки (рис.3).

Согласно результатам моделирования (рис.4), для задачи в упругой постановке нормальные тангенциальные напряжения максимальны на контуре выработки и составляют в точке 3 (на уровне почвы) σ_θ = 36 МПа (коэффициент концентрации K = 2,75), в точках 1 и 2 σ_θ = 29 МПа (K = 2,23) и σ_θ = 22 МПа (K = 1,69) соответственно.

Для нелинейной задачи максимальные значения нормальных тангенциальных напряжений на контуре выработки наблюдаются также в точке 3 (σ_θ = 8,8 МПа, коэффициент концентрации K = 0,68). Нормальные тангенциальные напряжения на контуре в

* Abaqus/CAE User's Manual. Dassault Systèmes, 2012.

точках 1 и 2 $\sigma_\theta = 8{,}4$ МПа ($K = 0{,}65$) и $\sigma_\theta = 7{,}4$ МПа ($K = 0{,}57$) соответственно. Как видно из рис.3, максимальные значения нормальных тангенциальных напряжений находятся на некотором удалении от контура выработки (от 2,5 до 9 м). Значения нормальных радиальных напряжений на контуре выработки равны нулю.

Сопоставление результатов расчета по линейной и нелинейной теориям (рис.5) показывает, что линейная теория дает значительно завышенное значение коэффициентов концентрации. Для железно-слюдково-мартитовых руд максимальное значение коэффициента увеличения напряжений на контуре для линейной теории составляет 4,04 (на уровне почвы), в боках и на уровне пяты свода 2,9 и 3,4 соответственно.

Из вышеизложенного следует, что при оценке напряженного состояния пород вокруг горных выработок неучет физической нелинейности деформирования реального массива пород или его пластических свойств дает некоторый запас по рассчитанным напряжениям. Вследствие этого упругие решения можно рассматривать как верхний предел возможных напряжений в реальных массивах горных пород.