

Л.А. МАНУКЯН

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ БОРТОВ НАГОРНЫХ КАРЬЕРОВ ВЫСОТНОГО ТИПА

Методом математического моделирования выполнена оценка изменения напряженного состояния в горных породах борта нагорного карьера от воздействия естественного склона, простирающегося над верхним горизонтом карьера.

Ключевые слова: нагорный карьер высотного типа, борт, напряженное состояние, призма активного давления, естественный склон, моделирование, изолинии составляющих напряжений, метод конечных элементов.

По сравнению с равнинными, нагорные карьеры отличаются сложностью и расчлененностью рельефных условий, крутизной и протяженностью склонов гор, на которых формируются борта карьера. Высокая интенсивность отработки и дальнейшая тенденция к углублению нагорных карьеров приводят к видоизменению их формы в пространстве. Обычный нагорный карьер с отстраиванием бортов в пределах высоты склона с течением времени может углубляться ниже господствующего уровня местности, превращаясь тем самым в карьер нагорно-глубинного типа.

В табл.1 по материалам работы [1] приведены показатели некоторых характерных карьеров нагорно-глубинного типа, расположенных на территории бывшего СССР.

Таблица 1

N п/п	Карьер	Общая глубина карьера, м	Высота частей карьера, м	
			глубинная	нагорная
1	Качканарский	200	40	160
2	Коршуновский	490	335	155
3	Ковдорский	600	494	106
4	Мукуланский	975	390	585
5	Каджаранский	450	390	60
6	Агараковский	360	280	80

Безаварийная эксплуатация карьеров, приведенных в табл.1, показывает, что, с точки зрения формирования устойчивого борта, более сложным и ответственным считается случай, когда выше бровки верхнего горизонта нагорного или нагорно-глубинного карьера простирается естественный склон

горных пород (рис.1). В условиях этих карьеров так называемого нагорно-глубинно-высотного типа борта находятся в сложно-напряженном деформированном состоянии. Здесь, начиная от верхней бровки борта в грунтах естественного склона, образуются участки, где грунт находится под действием растягивающих напряжений, которые рано или поздно приводят к образованию трещин разрыва [2]. В зоне влияния естественного откоса создается особое напряженное состояние, характеризующееся возникновением очагов концентрации напряжений.

В настоящее время напряженное состояние горных пород в протяженных бортах нагорных карьеров оценивается так же, как и в бортах равнинных карьеров. При этом напряженное состояние горных пород борта принято считать безопасным, если протяженность верхней бровки больше трехкратной высоты карьера [1]. Кроме этого, устойчивость бортов нагорных и глубинных карьеров оценивается с помощью широко известных методов решения плоских задач [3].

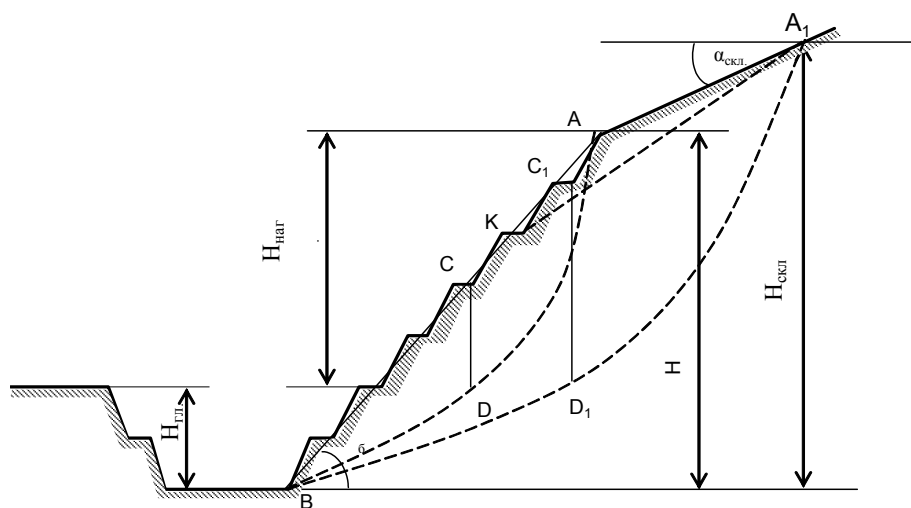


Рис.1. Схема борта карьера нагорно-глубинно-высотного типа:
 $H_{глуб}$ - высота глубинной части карьера; $H_{наг}$ - высота нагорной части карьера;
 $H = H_{глуб} + H_{наг}$ - высота нагорно-глубинного карьера; $H_{скл}$ - высота
нагорно-глубинно - высотного карьера

В условиях карьеров нагорно-глубинно-высотного типа, где над верхней бровкой карьера залегают инженерно-геологические элементы разного состава и протяженности, следует выполнить оценку напряженного состояния борта нагорного карьера, обусловленного «склоновым эффектом». Необходимо отметить, что в зависимости от соотношения углов наклона борта ($\alpha_{б}$) и склона ($\alpha_{скл}$) предельное напряженное состояние может возникнуть как в пределах высоты борта $H = H_{наг} + H_{глуб}$, так и всего склона $H_{скл}$ [1].

Очевидно, что величина крутизны склона над верхней бровкой борта предопределяет высоту всего карьера. В таких случаях нерациональные параметры бортов нагорного карьера глубинно-высотного типа приводят к производству работ по выемке значительных объемов пустых пород, обусловленных положением слабых поверхностей скольжения.

В этой связи в качестве решения этой проблемы необходимо выполнить расчеты коэффициента запаса устойчивости борта по возможным плоскостям скольжения, охватывающим массу горных пород на борту и естественного склона над верхней бровкой борта карьера. Фактически, расчеты сводятся к определению границ и соотношения масс призм активного давления и упора сползающей массы горных пород, разделенных осями $CД$ и $C_1Д_1$, соответственно, на возможных поверхностях скольжения AB и A_1B (рис.1). С целью повышения устойчивости борта карьера нагорно-глубинно-высотного типа в [1] предлагается дополнительно извлекать горную массу в объеме призмы A_1AK , что, помимо разгрузки призмы активного давления, позволяет совмещать верхнюю бровку борта карьера с отметкой естественного склона.

Существующие расчетные схемы для определения устойчивости бортов карьеров нагорно-глубинно-высотного типа малоэффективны. При прочих равных условиях это обусловлено слабой изученностью напряженного состояния горных пород всего борта карьера, а также обычно имеющими место значительными расхождениями между расчетными и фактическими параметрами потенциальной призмы обрушения борта.

В настоящее время в ряде исследований преследуется цель уточнения параметров бортов карьера путем оценки напряженно-деформированного состояния массива горных пород, слагающих борт карьера.

В [4] рассматривается метод оценки напряженного состояния законтурного массива, которая производится путем прессиометрических испытаний в буровых скважинах при давлениях, обеспечивающих гидроразрыв массива. Полученные при этом данные в последующем уточняются путем расчетов величин деформации разгрузки массива горных пород. Это позволяет, по мере постановки уступов в предельное положение на участках с характерными инженерно-геологическими условиями, создать специальные пункты, входящие в общекарьерную наблюдательную сеть.

Безаварийная отработка крутопадающих рудных залежей глубокими карьерами с предельно крутыми углами погашения бортов связана с усовершенствованием методов расчета устойчивости откосов скальных горных пород с учетом изменения напряженно-деформированного состояния породного массива при формировании карьерной выемки [5].

Известны методические разработки Института горного дела Минчермета бывшего СССР по исследованию влияния инженерно-геологических и геотехнических факторов на напряженно-деформированное состояние массива скальных горных пород и его модуля деформации, базирующиеся на анализе результатов измерений деформаций разгрузки на больших базах, выполняемых в процессе углубки карьера. По данным натурных исследований даны аналитические решения для определения углов погашения скальных откосов ряда глубоких карьеров, в которых учтены изменения напряженно-

деформированного состояния скального массива и трещинное давление грунтовых вод [6].

Необходимо отметить, что имеющиеся методы расчета устойчивости бортов карьера основаны на решении плоских задач и за последние 40 лет практически не усовершенствовались [7]. При этом вместо трех составляющих напряжений в плоской задаче учитывается только одна вертикальная составляющая, характеризующая вес столбов вышележащих пород, что ведет к занижению углов наклона борта.

Изучение процессов развития напряжений в бортах карьеров и откосах отвалов методами физического моделирования позволило преодолеть значительные трудности, возникающие при непосредственном наблюдении за изменением всех составляющих элементов процесса деформирования массива горных пород, протекающего в натурных условиях.

В настоящее время существует ряд методов физического моделирования для определения напряженного состояния откосов горных геотехнических сооружений. Наиболее распространенным из них является поляризационно-оптический метод, основанный на законах фотоупругости, позволяющий определить характер распределения напряжений в массиве горных пород под влиянием производства горных работ, получить качественную и количественную оценку поля напряжений в массиве горных пород, что имеет важное значение при выборе расчетной схемы определения устойчивых параметров откосов карьеров. Известен также способ физического моделирования горных геотехнических сооружений посредством использования результатов измерений, полученных с помощью тензометрической сетки совместно с поляризационно-оптическим методом [8]. Метод тензосетки позволяет определить величины вертикальных и горизонтальных напряжений, а поляризационно-оптический – касательные напряжения.

Приведенный выше краткий анализ методов оценки напряженно-деформированного состояния откосов отвалов и прибортовых участков карьеров показывает, что имеющиеся методы направлены на решение данной актуальной проблемы в условиях карьеров, где их борта не подвержены воздействию простирающихся над верхней бровкой последнего горизонта карьера веса горных пород естественного склона.

В настоящей статье предлагается решение этой задачи на основе математического моделирования процесса развития и распределения напряжений в бортах карьеров нагорно-глубинно-высотного типа с использованием математического аппарата, базирующегося на методе конечных элементов (МКЭ). Применение современной компьютерной техники способствовало быстрому развитию приемов решения нелинейных задач, которые, как правило, сводятся к многократному повторению линейных задач. Это позволит продуктивно применить МКЭ в механике грунтов и горных пород. Современные программы МКЭ представляют собой математическое моделирование всех процессов, протекающих в грунтах, с их многообразием механических свойств и условий нагружения [9].

Решение поставленной задачи сводилось к определению величин горизонтальных (σ_x), вертикальных (σ_y) и касательных напряжений (τ_{xy}) в трех произвольно взятых точках А, В и С, расположенных вблизи поверхности

борта, с учетом дополнительного воздействия горных пород высотного склона, простирающегося над верхней бровкой последнего горизонта нагорного карьера. В качестве исходных данных для расчетов приняты: высота борта нагорного карьера 100 м, угол наклона естественного склона горных пород, расположенных над бортом карьера, $\alpha_{\text{скл}} = 15, 30 \text{ и } 45^\circ$, удельный вес грунтов в склоновой части 25 кН/м^3 , коэффициент Пуассона 0,25.

Математический аппарат МКЭ обеспечивает сведение задачи интегрирования бигармонического дифференциального уравнения к решению системы линейных уравнений, в которых в качестве неизвестных фигурируют значения напряжений в узлах конечных элементов. Конечно-элементная расчетная сетка для принятых выше условий поставленной задачи приведена на рис.2. Как видно из рис. 2, исследуемая область борта нагорного карьера и надлежащие грунты толщи склона разбиты сеткой четырехугольными элементами, которые сгущаются в местах ожидаемых высоких градиентов напряжения. С помощью последующих расчетных итераций в заданных на борту точках А, В и С определены изолинии горизонтальных, вертикальных и касательных напряжений при угле наклона надстилающей толщи склона, равном $\alpha_{\text{скл}} = 30^\circ$, в условиях карьера нагорно-глубинно-высотного типа (рис.3).

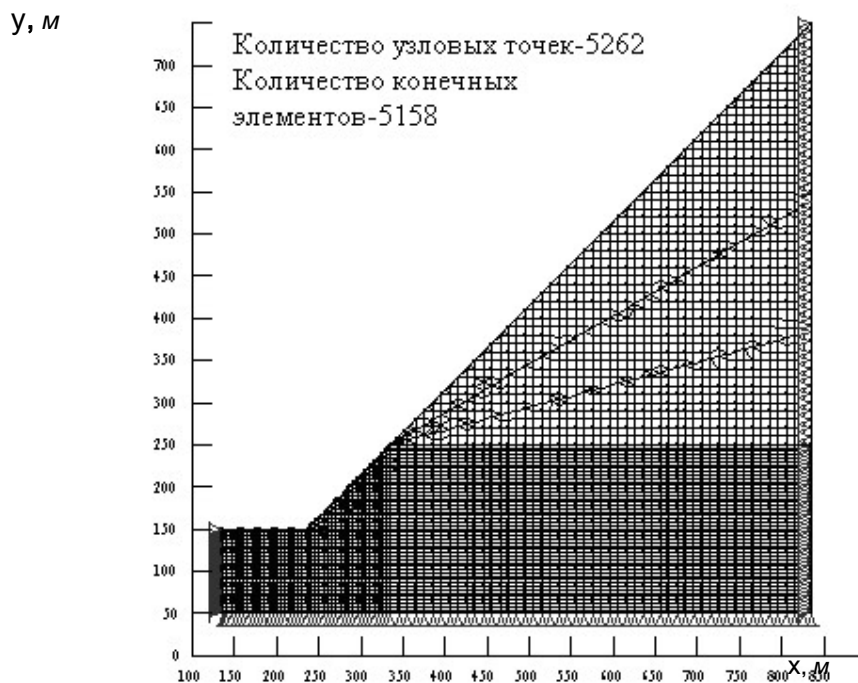
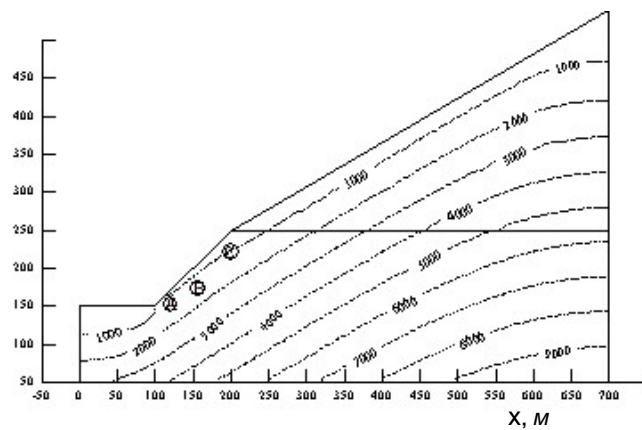


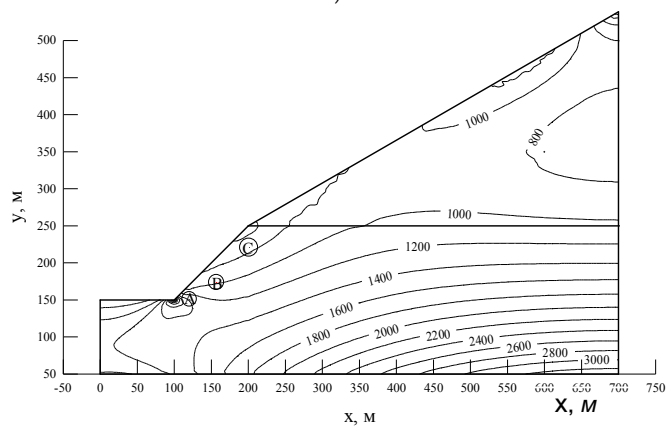
Рис.2. Конечно-элементная расчетная сетка

y, M



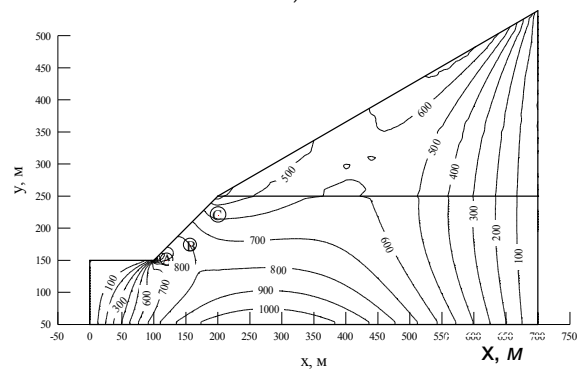
а)

y, M



б)

y, M



в)

Рис.3. Изолинии нормальных напряжений: а – вертикальные σ_y , кПа;

б – горизонтальные σ_x , кПа; в – касательные τ_{xy} , кПа

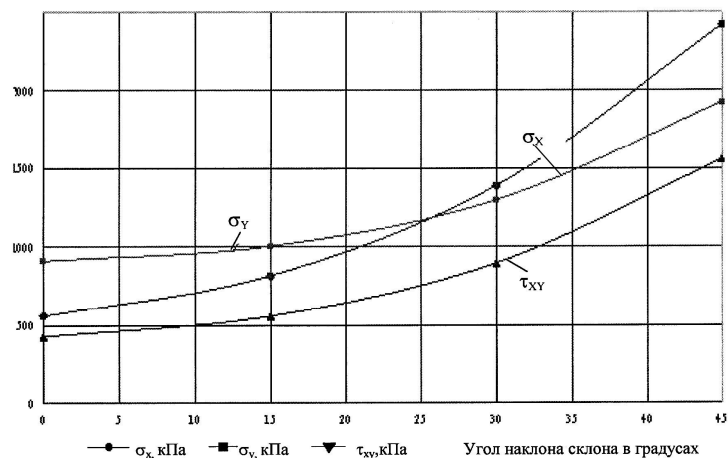
Аналогичные расчеты методом МКЭ произведены также для углов откосов надстиляющего над бортом нагорного карьера слоя горных пород $\alpha_{\text{скл}} = 15$ и 45° . Результаты расчетов сведены в табл.2, по данным которой разработаны зависимости изменения напряженного состояния горных пород в точках А, В и С борта нагорно-глубинно-высотного карьера.

Таблица 2

Точки, исследуемые на борту карьера	Угол откоса надстиляющей над бортом толщи горных пород, $\alpha_{\text{скл}}$	Составляющие напряжений в исследуемых точках борта		
		горизонтальные σ_x , кПа	вертикальные σ_y , кПа	касательные τ_{xy} , кПа
А	0	561	911	430
	15	818	1005	561
	30	1387	1296	897
	45	2420	1923	1555
В	0	416	1038	349
	15	584	1121	468
	30	975	1428	803
	45	1078	2198	1519
С	0	309	547	138
	15	406	661	233
	30	737	1000	570
	45	1442	2102	1419

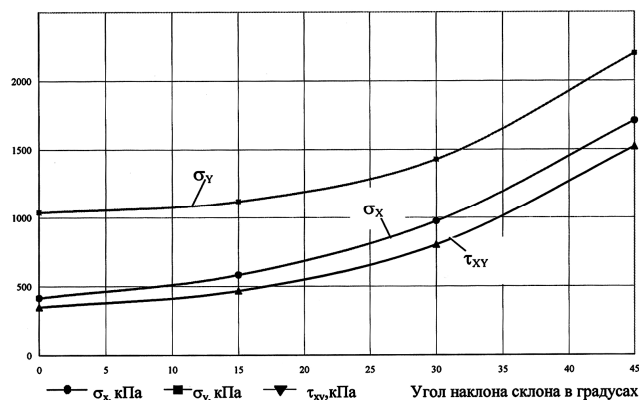
Анализ данных, полученных в табл.2, и разработанных зависимостей, приведенных на рис.4, показывает следующее.

σ , еПа



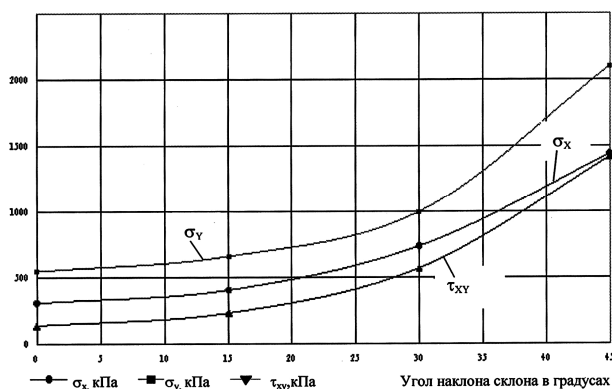
а)

σ , кПа



б)

σ , кПа



в)

Рис.4. Изменение напряженного состояния горных пород в точках:

а – А; б – В; в – С

Величины напряжений на борту в точках А, В и С значительно увеличиваются в зависимости от угла откоса надстиляющего высотного склона толщи горных пород. Например, при угле откоса высотного склона, равном $\alpha_{\text{скл}}=15^\circ$, все составляющие напряжений σ_x , σ_y и τ_{xy} в исследуемых точках, по сравнению с условием, когда $\alpha_{\text{скл}}=0$ (нагорно-глубинный карьер), в среднем увеличиваются соответственно на 39,2, 13,7 и 44,8%.

На основе математического моделирования напряженного состояния бортов карьера нагорно-высотного типа и аналогичных расчетов методом МКЭ показано, что имеется тенденция значительного роста напряжений в бортах карьера нагорно-высотного типа, зависящая от характеристик простирающейся над верхней бровкой борта толщи горных пород.

Выводы

1. В известных методических указаниях по расчету устойчивости бортов и откосов отвалов карьера недостаточно учтены специфические условия расположения нагорных карьеров.

2. С целью повышения точности определения параметров бортов выполнено математическое моделирование и расчет изменения напряженного состояния бортов горных пород от воздействия естественного склона, простирающегося над верхним горизонтом борта нагорно-высотного карьера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Валустьян Э.А.** Устойчивость бортов и отвалов нагорных карьеров // Горный журнал. – М., 1991. – ¹ 38. – С. 27-31.
2. **Терцаги К.** Теория механики грунтов. – М., 1961. – 499 с.
3. Методические указания по определению углов наклона бортов откосов уступов и отвалов строящихся и эксплуатируемых карьеров / ВНИМИ. – Л., 1972. – 165с.
4. Методические особенности наблюдений за деформациями скальных откосов железорудных карьеров / **В.Г.Зотеев, Н.А.Ворошилов, А.В.Мелихов, В.В. Ялунин** // Новые методы и технические средства производства маркшейдерских работ: Матер. конф. маркшейдеров КМА (сентябрь 1975г.)/ ВИОГЕМ. – Белгород, 1975. – С. 150-152.
5. **Зотеев В.Г., Ялунин В.В., Морозов В.Н.** Устойчивость бортов и уступов глубоких карьеров // Горный журнал. – М., 1988. – ¹ 8. – С. 35-39.
6. **Зотеев В.Г., Фролов А.В.** Теория и практика устойчивости бортов карьеров и отвалов // Горный журнал. – М., 1987. – ¹ 2. – С. 27-31.
7. **Быковцев А.С., Беленко А.П., Сытенков В.Н.** Определение рациональной формы борта глубоких карьеров // Горный журнал. – М., 1999. – ¹ 2. – С. 33-35.
8. **Демин А.М., Шушкина О.И.** Напряженное состояние и устойчивость отвалов в карьерах. – М.: Недра, 1978. – 159 с.
9. **Фадеев А.В.** Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 221 с.

ЗАО “Горно-металлургический институт”. Материал поступил в редакцию 20.08.2006.

Լ.Ա. ՄԱՆՈՒԿՅԱՆ

ԲԱՐՁՐԱԴԻՐ ՏԻՊԻ ԼԵՌՆԱՑԻՆ ԲԱՑԱՀԱՆՔԵՐԻ ԿՈՂԵՐԻ ԼԱՐՎԱԾԱՅԻՆ ՎԻՃԱԿԻ
ՄԱԹԵՄԱՏԻԿԱԿԱՆ ՄՈԴԵԼԱՎՈՐՈՒՄ

Կատարված է բացահանքի վերին հորիզոնի վրա տարածվող բնական լանջի ազդեցությունից լեռնային բացահանքի կողերի ապարներում լարվածային վիճակի փոփոխության գնահատում մաթեմատիկական մոդելավորման մեթոդով:

Առանցքային բառեր. բարձրադիր տիպի լեռնային բացահանք, կող, լարվածային վիճակ, ակտիվ ճնշման պրիզմա, բնական լանջ, մոդելավորում, լարումների բաղադրիչների իզոգծեր, վերջնական էլեմենտների մեթոդ:

L.A. MANUKYAN

MATHEMATICAL MODELLING OF THE INTENSE CONDITION FOR OPEN PIT BOARDS OF
THE HIGH ALTITUDE TYPE

The estimation of an intense condition change in rocks of a mountain open pit board from influence of a natural slope reaching above the top horizon of the open pit is realized by the method of mathematical modelling.

Keywords: upland open high-altitude type, board, intense condition, prism of the active pressure, natural slope, modelling, stress component, isolines, finite- element method.