УДК 622.284

А.М.МОЧАЛОВ, *канд. техн. наук, заведующий лабораторией*
А.В.ЧЕБАКОВ, *аспирант, an_86@list.ru*
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

A.M.MOCHALOV, *PhD in eng. sc., laboratory head,*
A.V.CHEBAKOV, *post-graduate student, an_86@list.ru*
Saint Petersburg State Mining Institute (Technical University)

РАЗВИТИЕ ДЕФОРМАЦИЙ В ОДНОРОДНОМ ОТКОСЕ ПРИ ПОЭТАПНОЙ ОТРАБОТКЕ

Борта глубоких карьеров представляют собой сложные инженерные сооружения, от состояния которых зависит безопасность горных работ. По мере углубки и вскрытия новых горизонтов при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом в результате долговременного процесса в прибортовом массиве карьеров происходит изменение природного напряжения и накапливаются усталостные напряжения, которые приводят к деформациям бортов, заканчивающимся в отдельных случаях катастрофическими обрушениями и оползнями.

Предотвращение опасных разрушающих деформаций прибортовых массивов во многом зависит от достоверной оценки развивающихся деформаций.

Ключевые слова: моделирование, эквивалентные материалы, метод конечных элементов, деформации.

DEVELOPMENT OF STRAINS IN UNIFORM SLOPES WITH PHASED MINING

Side deep pits are complex engineering structures, which depend on the state of mine safety. As bating and opening new horizons in the development of mineral deposits open as a result of long-term at the edge array of pits are changing the natural stress and accumulated fatigue, which leads to deformation of the sides, ending in some cases, catastrophic collapses and landslides.

Prevention of dangerous destructive strains edge arrays depends on reliable assessment of emerging strains.

Key words: modeling, equivalent materials, finite element method, deformation.

Массив горных пород является весьма сложной средой, в которой при ведении горных работ одновременно происходят процессы деформирования различного характера. Проследить весь процесс деформирования от зарождения до разрушения прибортового массива на карьере весьма сложно в связи с тем, что натурные исследования отличаются значительной трудоемкостью, высокой стоимостью, требуют довольно длительных наблюдений. Поэтому моделирование (эквивалентными материалами, компьютерное) открывает такие возможности изучения геомеханических процессов, которые не позволяют получить ни аналитические методы, ни наблюдения и измерения в натурных условиях.

Объектом исследования процессов деформирования принят однородный откос из эквивалентных материалов с поэтапной отработкой модели.

Изучение процесса деформирования откосов методом эквивалентных материалов производилось во ВНИМИ под руководством

А.М.Мочалова на плоском стенде размерами 250 × 50 × 150 см. Отработка модели и оформление откоса осуществлялась с шагом углубки, который соответствовал уменьшению расчетного коэффициента запаса устойчивости на величину 0,1.

Расчетные коэффициенты запаса устойчивости для каждого этапа отработки модели:

Высота откоса, см	Угол наклона, град	Расчетный коэффициент запаса устойчивости
21,5	45	1,50
30,5	45	1,30
39,0	45	1,20
44,5	45	1,15
47,5	45	1,13
52,0	45	1,08
57,5	45	1,02

При каждом новом положении откос выдерживался до стабилизации деформаций. Смещения реперов фиксировались путем фотографирования модели фототеодолитом и индикаторами часового типа.

Физико-механические характеристики смеси для моделирования: угол внутреннего трения $\varphi = 30°$, плотность $\gamma = 3340$ кН/м^3, сцепление $C = 585$ Па, модуль деформации $E = 2 \cdot 10^6$ Па, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$.

Кроме эквивалентного моделирования, изучение процесса деформирования откосов модели было произведено при помощи компьютерного моделирования, основанного на методе конечных элементов (МКЭ). За исходные характеристики физико-механических свойств были приняты данные моделирования из эквивалентных материалов.

При моделировании сравнивались горизонтальные деформации. Полученные результаты приведены в таблице.

В соответствии с полученными результатами двойного моделирования можно вывести ряд закономерностей развития деформаций в однородном откосе.

Необходимо отметить, что в процессе поэтапной отработки модели на поверхности откоса прослеживается скачкообразное распределение горизонтальных деформаций с максимумом значения на расстоянии 0,2 м от верхней бровки борта (рис.1-3). Это объясняется тем, что в процессе отработки карьера на поверхности образуются трещины. Максимальные растягивающие деформации, значения которых увеличиваются с увеличением глубины модели, показывают реальное место откола и обрушения части массива.

Также следует отметить, что зона максимальных горизонтальных деформаций рас-

Результаты моделирования эквивалентными материалами и МКЭ

Номер этапа отработки модели	Вид моделирования	Расчетный коэффициент запаса устойчивости	Максимальное значение горизонтальных деформаций на поверхности борта модели	Расстояние от верхней бровки откоса до максимального значения горизонтальных деформаций на поверхности, м
1	Эквивалентное	1,50	0,0017	0,12
	Компьютерное (МКЭ)	1,50	0,0017	0,23
2	Эквивалентное	1,30	0,0027	0,12
	Компьютерное (МКЭ)	1,25	0,0021	0,15
3	Эквивалентное	1,20	0,0032	0,12
	Компьютерное (МКЭ)	1,19	0,0021	0,15
4	Эквивалентное	1,15	0,0062	0,30
	Компьютерное (МКЭ)	1,19	0,0032	0,22
5	Эквивалентное	1,13	0,007	
	Компьютерное (МКЭ)	1,13	0,0034	0,19
6	Эквивалентное	1,08	0,0136	0,17
	Компьютерное (МКЭ)	1,08	0,0025	0,20
7	Эквивалентное	1,02	0,015	0,17
	Компьютерное (МКЭ)	1,02	0,01	0,24

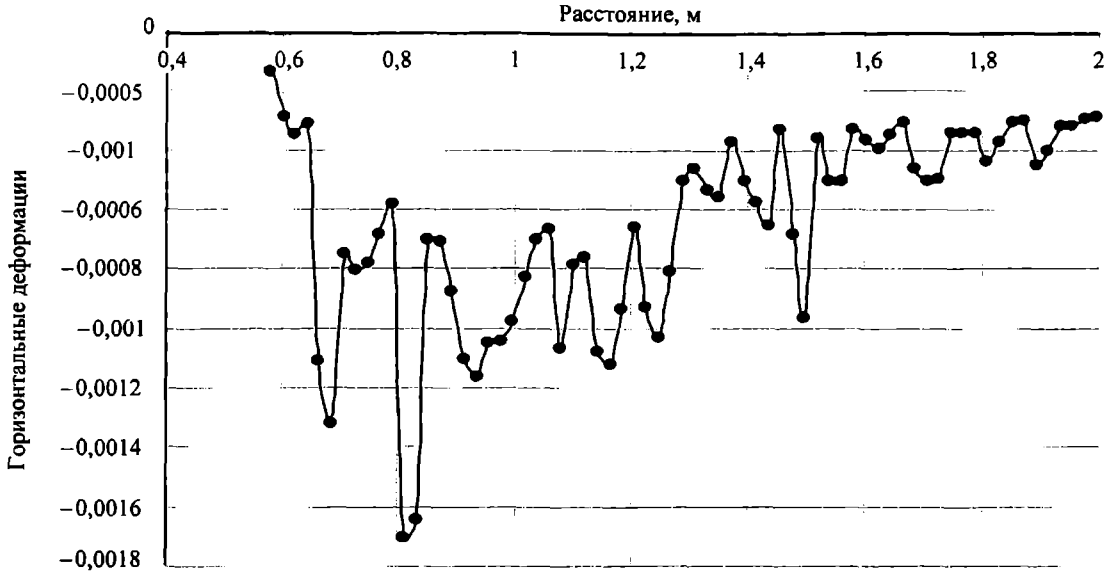


Рис.1. Распределение горизонтальных деформаций по поверхности после первого этапа отработки модели (результаты компьютерного моделирования, за начало координат принята нижняя бровка борта на конец отработки модели)

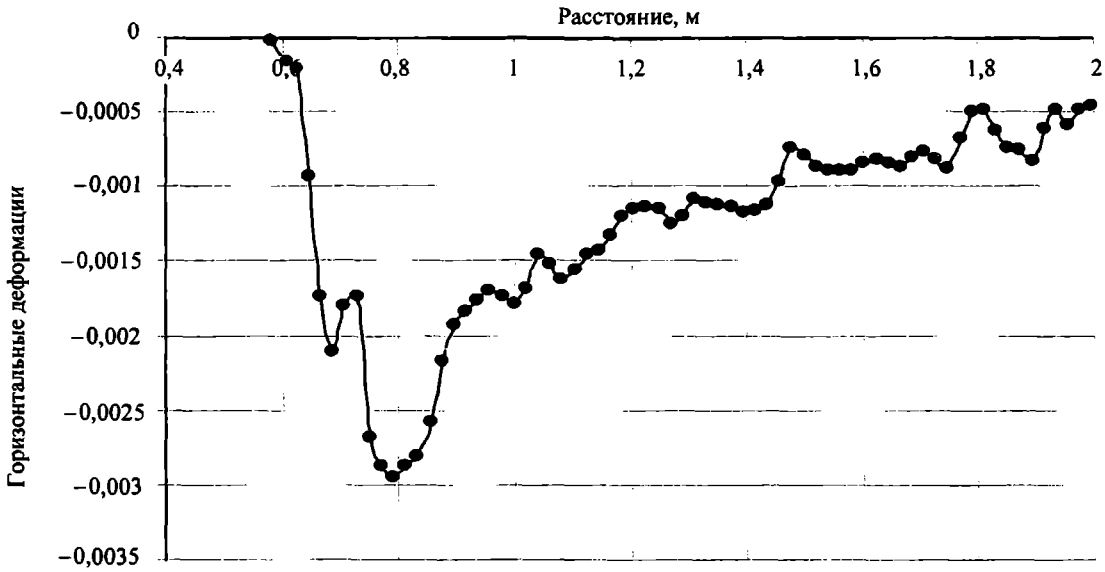


Рис.2. Распределение горизонтальных деформаций по поверхности после седьмого этапа отработки модели (результаты компьютерного моделирования, за начало координат принята нижняя бровка борта на конец отработки модели)

положена в глубине прибортового массива и приурочена к середине борта (рис.4, 5). С увеличением глубины отработки модели увеличиваются значения максимальных горизонтальных деформаций. Результат такого напряженно-деформированного состояния прибортового массива – выпирание пород по линии откоса.

После ряда испытаний на моделях из эквивалентных материалов и с помощью компьютерного моделирования на основе МКЭ авторами было установлено, что в прибортовом

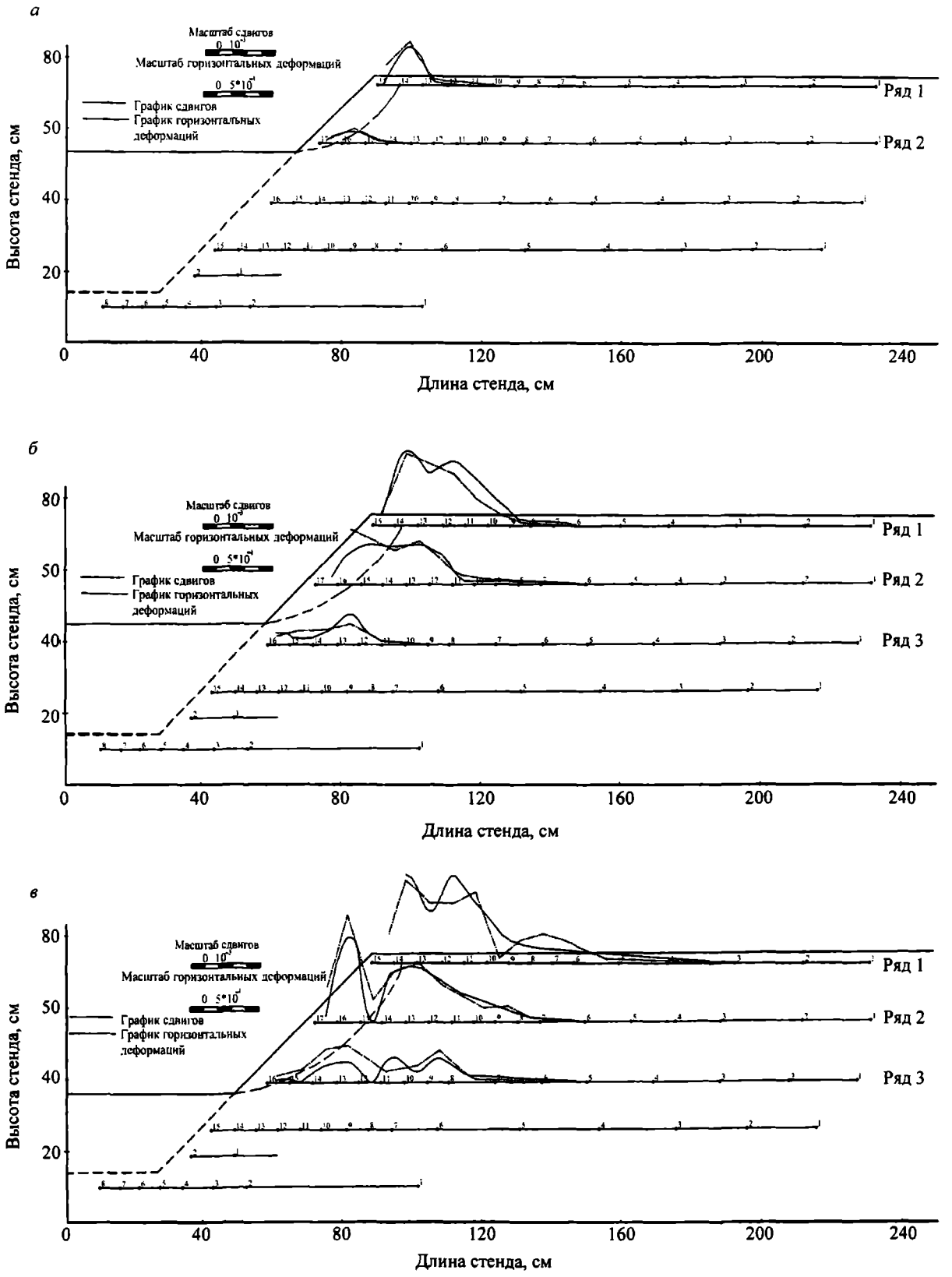


Рис.3. Развитие деформаций в откосе однородной среды на первых трех этапах отработки модели (моделирование эквивалентными материалами)
а – I этап; *б* – II этап; *в* – III этап

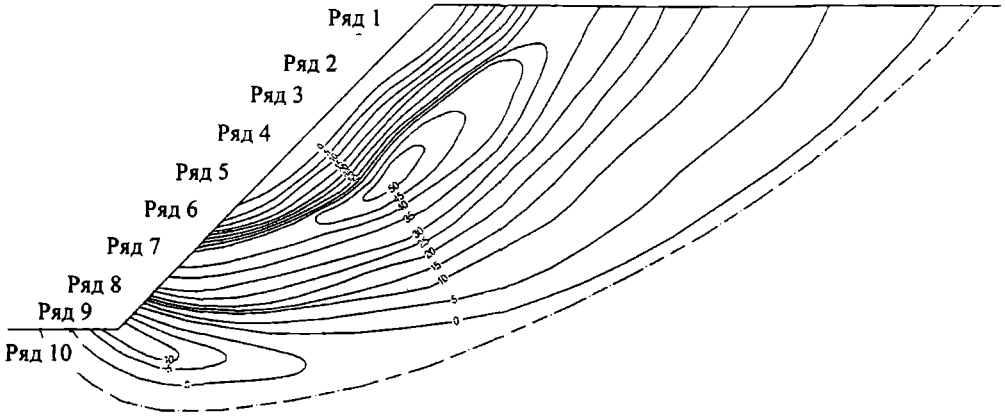


Рис.4. Изолинии предельных горизонтальных деформаций откоса модели (моделирование эквивалентными материалами)

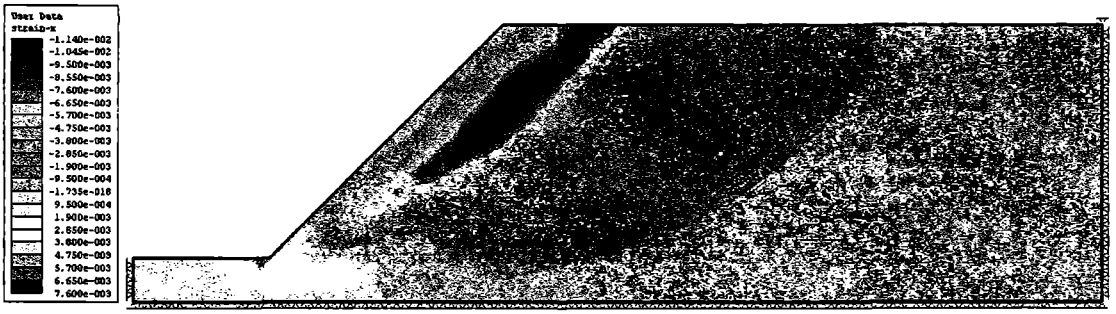


Рис.5. Распределение горизонтальных деформаций откоса модели (компьютерное моделирование)

однородном массиве поверхность скольжения не выходит на нижнюю бровку откоса. Напротив, поверхность скольжения на линии откоса располагается на высоте 0,2H, где H – высота откоса (рис.4, 5).

Таким образом, полученные результаты моделирования однородного откоса эквивалентными материалами и компьютерного моделирования, основанного на МКЭ, в целом позволяют проследить процесс деформирования откоса до предельного состояния. Применение выявленных закономерностей позволит предотвратить образование оползней на карьерах путем предупреждения разрушения прибортового массива.

Результаты моделирования эквивалентными материалами и результаты компьютерного моделирование МКЭ сопоставимы. Это позволяет сделать вывод о том, что использованное программное обеспечение может успешно применяться при оценке напряженно-деформированного состояния бортов карьеров в натурных условиях.