

МНОГОФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ВЫСОКИХ ВНУТРЕННИХ ОТВАЛОВ В УСЛОВИЯХ ПОЛОГО-НАКЛОННОГО ОСНОВАНИЯ

*Б.Р. Ракишев, Казахский национальный технический университет имени К.И. Сатпаева,
Республика Казахстан*

А.Н. Шашенко, А.С. Ковров, ГВУЗ «Национальный горный университет», Украина

Выполнена геомеханическая оценка безопасных параметров внутреннего отвалообразования на угольном разрезе «Майкубенский» с учетом физико-механических характеристик складываемых пород и нагрузок от горнотранспортного оборудования. Определены устойчивые параметры внутренних отвалов, складываемых на полого-наклонном основании с углами падения до 10° .

Введение. Необходимость использования выработанного пространства карьера для размещения вскрышных пород с экологической точки зрения не вызывает сомнения. Однако, и на сегодняшний день применение систем с внутренним отвалообразованием на месторождениях с наклонным залеганием пластов весьма ограничено. Объясняется это как сложностью применения таких систем, так и недостаточно исследованными процессами вскрытия и отвалообразования в период перехода на внутренний отвал.

Модель динамики развития внутреннего отвала на наклонном основании строится с учетом заданных параметров его ярусов (ширина рабочей площадки, высота или отметка яруса, естественный угол откоса), горно-геологических условий месторождения и данных об устойчивых углах откоса отвала [1].

Для решения этой достаточно сложной в трехмерном пространстве задачи применяются методы численного моделирования, позволяющие свести решение к ряду плоских задач.

Современное состояние исследований по геомеханике отвалов. Управление состоянием массива горных пород и прогнозирование устойчивости бортов карьеров и отвалов является одной из важнейших инженерных задач для обеспечения безопасности и эффективности работ при открытом способе разработки месторождений. В настоящее время разработано около 300 методов, позволяющих изучать геомеханические процессы в откосах карьеров и отвалах, что позволяет прогнозировать их устойчивость с учетом влияния естественных и техногенных факторов.

Исследованию деформационных процессов в откосах и прибортовых массивах горных пород на карьерах посвящены работы Ю.П. Астафьева, С.З. Полищука, И.В. Баклашова, Э.Л. Галустьяна, А.М. Гальперина, А.М. Демина, П.Н. Панюкова, М.Е. Певзнера, И.И. Попова, Г.Л. Фисенко и др. авторов [2]. Несмотря на многочисленные исследования, проблема обеспечения устойчивости отвалов на карьерах, в силу своей сложности и разнообразия горно-геологических и гидрогеологических особенностей месторождений, остается актуальной.

Целью данной работы является геомеханическая оценка безопасных параметров внутреннего отвалообразования для условий Майкубенского месторождения (Казахстан).

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- выполнить численное моделирование и геомеханическую оценку безопасных параметров внутреннего отвалообразования для рассматриваемого разреза с учетом физико-механических характеристик складываемых пород и нагрузок от горнотранспортного оборудования с использованием программы конечно-элементного анализа Phase2;
- определить устойчивые параметры внутренних отвалов размещаемых в выработанном пространстве карьера на пологом и полого-наклонном основании с углами падения до 10° .
- обосновать устойчивые параметры бестранспортной вскрыши при бульдозерном отвалообразовании.

Характеристика горных работ и внутреннего отвалообразования. Угольный разрез «Майкубенский» (Республика Казахстан) разрабатывает Шоптыкольское месторождение открытым способом с проектной мощностью разреза 25 миллионов тонн угля в год. В настоящее время фактические объемы производства составляют около 4 миллионов тонн в год. В перспективе предусматривается увеличение добычи Майкубенских углей до 8 миллионов тонн в год. Шоптыкольское месторождение характеризуется пологим и полого-наклонным залеганием угольных горизонтов в пределах от 4 до 10°. Исключение составляет лишь незначительная площадь в крайней западной части, где углы падения достигают 12-14°. Средний угол падения пластов по Центральному и Восточному участкам составляет 7°.

Отработка вскрышных уступов осуществляется одноковшовыми экскаваторами-мехлопатами типа ЭКГ-10, ЭКГ-5А, ЭКГ-4у, ЭКГ-5В. Транспортировка вскрыши - железнодорожным и автотранспортом. Погрузка вскрышных пород производится в думпкары грузоподъемностью 105 т типа 2ВС-105. Технологический автотранспорт на вскрыше – автосамосвалы БелАЗ-75485, БелАЗ-7523, БелАЗ-7549, БелАЗ-7522.

Фактическая средняя высота уступа – 10–12 м. Длина вскрышных работ 6,6 км. Среднегодовое подвигание вскрышных уступов – 10 м. Внутренняя вскрыша из пройденной роторным экскаватором заходки отгружается погрузчиком в автотранспорт и вывозится во внутренний отвал. Внутренняя вскрыша, отработанная одноковшовыми экскаваторами, также транспортируется автотранспортом во внутренний отвал участка Центральный. На внутреннем отвале принято бульдозерное отвалообразование.

На основной части месторождения углы падения угольных пластов полого-наклонные (4-12°), что позволяет складировать вскрышные породы в выработанном пространстве. Организация внутреннего отвала позволит резко сократить уровень затрат на транспортировку вскрышных пород, уменьшить экологическую нагрузку на территорию.

Внутренний отвал участка формируется одноковшовыми экскаваторами ЭКГ-10 двумя ярусами. При формировании внутреннего отвала в районе участка Центральный принята сложная комбинированная схема внутреннего отвалообразования – бестранспортная и автотранспортная. Согласно проекту горных работ отсыпаны 2 яруса отвала. Нижний ярус высотой 40 м формируется драглайном ЭШ-15/100, верхний – бульдозером Т-25.01, высотой до 40 м. Угол естественной отсыпки $\alpha = 35^\circ$. Оптимальная высота первого и второго ярусов может быть доведена до 80 м, при ширине предохранительной бермы на поверхности первого яруса 70 м. Максимальная высота первого яруса внутреннего отвала принята равной 40 м [3].

Геомеханическая оценка устойчивости внутренних отвалов. Для численного моделирования геомеханических процессов в отвальных массивах использовалась лицензионная программа конечно-элементного анализа Phase2 Rocscience Inc., приобретенная Научно-образовательным центром Национального горного университета (г. Днепропетровск, Украина) в рамках международного проекта «Устойчивость геотехнических систем: риски, процессы и явления» (грант USB1-021-DP-07 Фонда развития гражданских исследований CRDF, США). Программа Phase2 позволяет моделировать геомеханические процессы, происходящие в грунтовом массиве и анализировать процесс снижения предела прочности на сдвиг (*Shear Strength Reduction Method*) в породном массиве. Функция снижения прочности на сдвиг (*Shear Strength Reduction*) в Phase2 позволяет автоматически выполнять конечно-элементный анализ и вычислять критический коэффициент снижения прочности *KСП* (*SRF, Strength Reduction Factor*), который эквивалентен коэффициенту запаса устойчивости (*КЗУ*). Алгоритм расчета коэффициента устойчивости массива включает итерационное вычисление прочностных характеристик во всех элементах массива посредством поэтапной нагрузки модели, в результате чего напряжения в откосе достигают предела прочности на сдвиг и возникает сдвижение пород (оползень). Процесс вычислений *KСП* повторяется до момента потери откосом устойчивого состояния и графически выражается в виде наиболее вероятной линии скольжения, по которой происходит сдвижение массива. Если $KСП > 1$, то откос находится в устойчивом состоянии, а при $KСП < 1$ возникает оползень.

Рекомендуемые значения коэффициента запаса устойчивости для отвальных массивов приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Значения коэффициентов запаса устойчивости для отвальных массивов [2]

Отвалообразующие породы	Тип отвала	Основание отвала	Рекомендуемый коэффициент запаса устойчивости
Скальные и полускальные	Внешний	Прочное	1,05
	Внутренний	Слоистое	1,05*–1,10
Рыхлые песчано-глинистые	Внешний	Прочное	1,10
		Слоистое	1,10*–1,20
	Внутренний	Прочное	1,10*–1,15
		Слоистое	1,20
Слабые глинистые	Внешний	Прочное	1,20
		Слабое	1,20*–1,30
		слоистое	1,20
	Внутренний	Прочное	1,20*–1,30
Слоистое			
Скальные, полускальные Рыхлые песчано-глинистые	Нагруженный	Любое	1,10*–1,20
			1,20–1,30

* Показатели физико-механических свойств пород отвалов и их оснований определяются методом обратных расчетов или натурными испытаниями.

Предельная высота отсыпки 1 яруса отвала. Параметры отвалов в основном зависят от несущей способности оснований отвалов, прочностных характеристик складированных пород и технологических параметров применяемого горнотранспортного оборудования.

Для условий разреза «Майкубенский» согласно предварительно выполненным инженерно-геологическим изысканиям [3] расчетные прочностные характеристики отсыпаемых в отвалы пород при коэффициенте запаса устойчивости $n = 1,20$ будут иметь следующие значения: сцепление $C_n = 1,6 \text{ тс/м}^2$ (0,016 МПа); угол внутреннего трения $\varphi_n = 29^\circ$; плотность $\gamma = 1,72 \text{ т/м}^3$.

Формирование отвала осуществляется бульдозером Д-394 на базе трактора Т-330Р. Удельная нагрузка данного типа бульдозера на грунт составляет $P = 4,39 \text{ тс/м}^2$ (0,043 МПа). Предельная высота вертикального откоса рассчитанная по методическим рекомендациям [4] $H_{90} = 0,6 \text{ м}$, а величина сопротивления пород сжатию $\sigma_0 = 5,43 \text{ тс/м}^2$ (0,054 МПа). При угле откоса свежееотсыпанного отвала $\alpha_{\text{отк}} = 35^\circ$ условная высота откоса $H' = 27 \text{ м}$, а предельная высота откоса с учетом веса бульдозера Д-394, формирующего отвал, будет равна $H = H' \cdot H_{90} = 16,2 \text{ м}$.

Основной задачей геомеханического моделирования является определение предельных параметров возведения внутренних отвалов, оценки их устойчивости с учетом физико-механических характеристик пород основания и вскрышных пород и нагрузки от горнотранспортного оборудования при различных системах отвалообразования.

На рис. 1 представлена геомеханическая модель для анализа устойчивости внутреннего двухъярусного отвала при бульдозерном отвалообразовании. Геометрические размеры модели – 600x120 м, при этом основание с размерами 600x75 м представлено коренными породами. Согласно проекту отвалообразования на разрезе «Майкубенский» и предварительным

инженерным расчетам высота первого яруса отвала составляет 40 м, а второго яруса – до 40

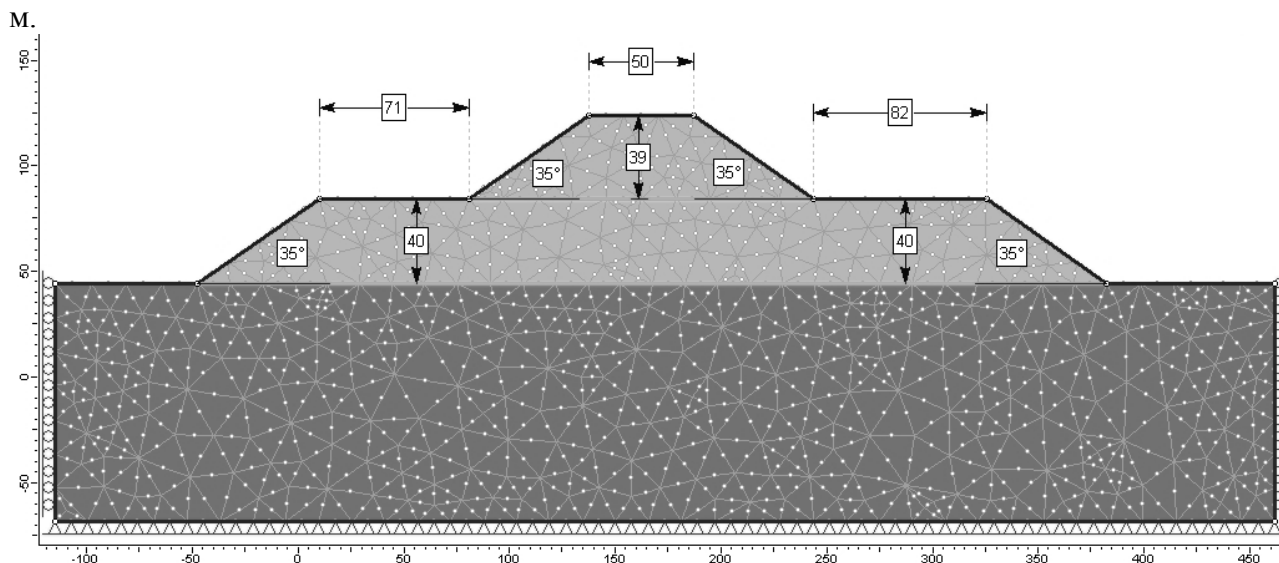


Рис. 1. Модель для расчета устойчивости внутреннего отвала

Устойчивость отвала оценивалась посредством поэтапного наращивания его высоты H с шагом 10 м и положением бульдозера Д-394 на базе трактора Т-330Р к краю бровки на расстоянии $b = 2 \dots 10$ м. с шагом 2 м.

При формировании первого слоя высотой $H = 10$ м в приоткосном массиве отсыпаемых в отвал вскрышных пород преобладают горизонтальные смещения $U_x = 0,03 \dots 0,06$ м. Максимальные сдвиговые деформации достигают значений $\varepsilon_{\max} = 0,15$. Расстояние $b = 4$ м от бульдозера до края бровки является критическим, так как возникает опасность сдвижения пород.

При наращивании высоты отвала до $H = 20$ м устойчивость откосов при углах наклона свежееотсыпанного отвала $\alpha_{\text{отк}} = 35^\circ$ снижается с 2,4 до 1,56 без учета нагрузок от оборудования. Максимальные деформации сдвига достигают значений $\varepsilon_{\max} = 0,3$, а горизонтальные смещения $U_x = 0,6 \dots 1,2$ м. Расстояние $b = 6$ м от бульдозера до края бровки является предельным.

При $H = 30$ м устойчивость откосов при углах наклона свежееотсыпанного отвала $\alpha_{\text{отк}} = 35^\circ$ снижается с 1,56 до 1,32 без учета нагрузок от оборудования. Максимальные деформации сдвига достигают значений $\varepsilon_{\max} = 0,1$, а горизонтальные смещения в приоткосных участках $U_x = 0,6 \dots 1,2$ м. Отличительной особенностью увеличения высоты отвала до заданных значений является возникновение и развитие зон повышенных деформаций у подошвы первого яруса отвала на границе с породами основания. При $H = 40$ м эти зоны имеют четко выраженный характер участков дестабилизации устойчивости основания отвала (выдавливание пород), нарастание сдвиговых деформаций в которых способствует инициации развития поверхности скольжения. Общий КЗУ = 1,25 без учета нагрузок от оборудования. Максимальные деформации сдвига достигают значений $\varepsilon_{\max} = 0,54 \dots 0,6$, а горизонтальные смещения в приоткосных участках $U_x = 0,6 \dots 0,9$ м. Расстояние $b = 10$ м от края бульдозера до края бровки является критическим, поскольку в породном массиве образуется участок закола, от которого развивается поверхность скольжения (рис. 2).

Согласно методическим рекомендациям [4] для отвалов КЗУ $\geq 1,2$ при эксплуатации до 5 лет и КЗУ $\geq 1,3$ при эксплуатации более 5 лет. При этом, в технологии отвалообразования следует учитывать эффект ослабления прочностных характеристик пород при возрастании влажности массива, а также динамических нагрузках от горнотранспортного оборудования.

На рис. 3 представлены зависимости коэффициента запаса устойчивости первого яруса отвала от расположения горнотранспортного оборудования. Результаты вычислений КЗУ для высот отвала от 10 до 40 м представлены в виде сходных степенных линий тренда.

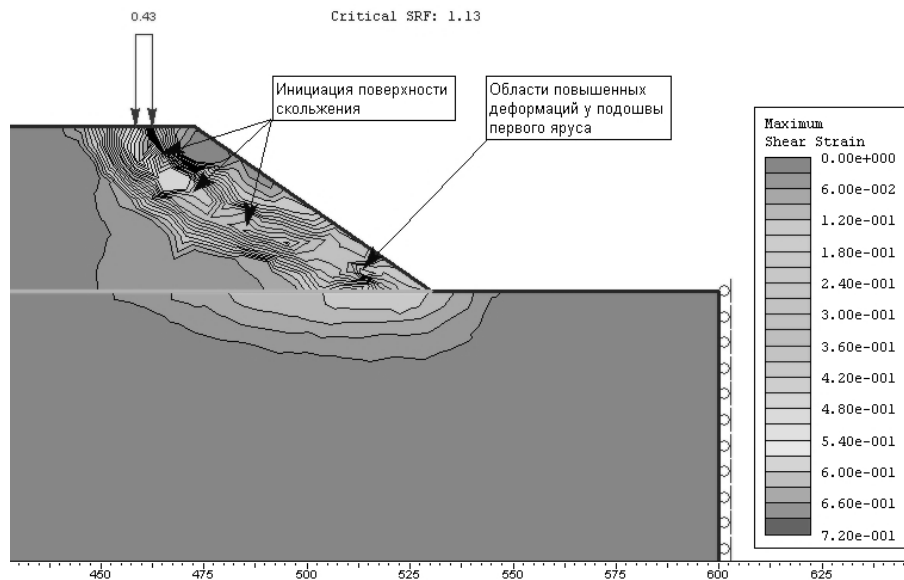


Рис. 2. Нарастание деформаций и возникновение поверхности скольжения в подошве отвала первого яруса при $H = 40$ м

Возведение отвала с высотой первого яруса $H \geq 40$ м нецелесообразно, так как нарастание сдвиговых деформаций в приоткосной части отвала и на границе с породами основания создает условия для масштабных оползневых процессов в массиве, что со временем приведет к выполаживанию угла откоса отвала до $\alpha_{\text{отк}} = 28...30^\circ$.

Замечательно, что при наращивании высоты первого яруса больше 40 м устойчивость отвала изменяется в довольно узких пределах: КЗУ = 0,99...1,09 при заданных расстояниях от края бульдозера до края бровки $b = 2...10$ м.

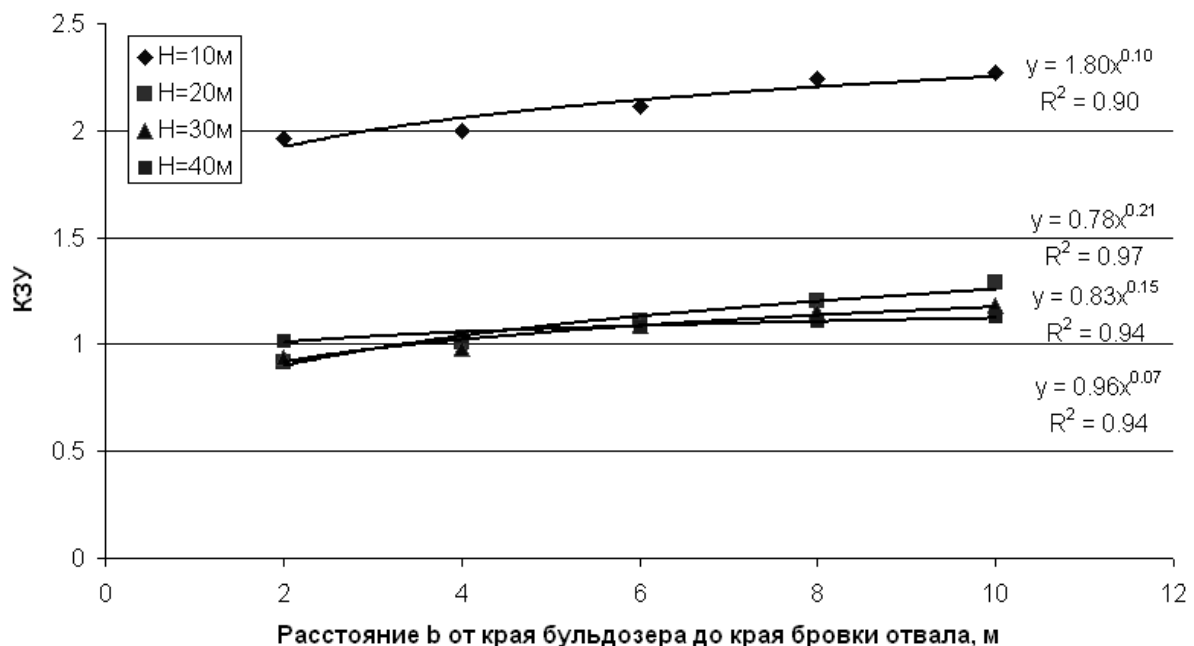


Рис. 3. Зависимость коэффициента запаса устойчивости первого яруса отвала от расположения горнотранспортного оборудования

Предельная высота отсыпки 2 яруса отвала. Устойчивость отвала при отсыпке 2 яруса оценивалась аналогично этапам численного моделирования устойчивости 1 яруса отвала посредством поэтапного наращивания его высоты H с шагом 10 м и положением бульдозера Д-394 к краю бровки в интервале $b = 2...10$ м. При этом, ширина бермы безопасности $a = 75$ м согласно проекту.

При формировании первого слоя высотой $H = 10$ м в приоткосном массиве отсыпаемых в

отвал вскрышных пород практически не наблюдается деформаций и смещений, которые изменяют устойчивость всего породного массива по сравнению с предыдущим этапом возведения 1 яруса. Так, горизонтальные смещения $U_x = 0,1 \dots 0,2$ м, а максимальные деформации сдвига незначительные и варьируют в диапазоне $\varepsilon_{\max} = 0,03 \dots 0,05$. КЗУ = 1,23 как без нагрузки, так и с нагрузкой от бульдозера, т.е. обусловлен преимущественно деформациями в откосах 1 яруса.

При наращивании высоты отвала до $H = 20$ м устойчивость откосов при углах наклона свежееотсыпанного отвала $\alpha_{\text{отк}} = 35^\circ$ КЗУ снижается незначительно с 1,23 до 1,20 без учета нагрузок от оборудования. Максимальные деформации сдвига в откосах 2 яруса достигают значений $\varepsilon_{\max} = 0,09$, а горизонтальные смещения $U_x = 0,1 \dots 0,2$ м. КЗУ = 1,20...1.22 при $b = 2 \dots 10$ м.

При наращивании высоты 2 яруса отвала до $H = 30$ м устойчивость откосов при углах наклона свежееотсыпанного отвала $\alpha_{\text{отк}} = 35^\circ$ остается неизменной, также как и максимальные деформации сдвига $\varepsilon_{\max} = 0,09 \dots 0,1$, а горизонтальные смещения в приоткосных участках $U_x = 1,0 \dots 1,3$ м. КЗУ = 1,21 при $b = 2 \dots 10$ м.

При $H = 40$ м эти зоны деформаций массива имеют четко выраженный характер участков дестабилизации устойчивости основания отвала (выдавливание пород), нарастание сдвиговых деформаций в которых способствует инициации развития поверхности скольжения. Общий КЗУ = 1,21 без учета нагрузок от оборудования. Максимальные деформации сдвига достигают значений $\varepsilon_{\max} = 0,12 \dots 0,16$. Горизонтальные смещения в приоткосных участках $U_x = 2,0 \dots 2,5$ м, которые возрастают в зависимости от положения горнотранспортного оборудования к краю бровки, что свидетельствует о масштабных оползневых процессах в массиве. В откосах 2 яруса четко прослеживается поверхность скольжения (рис. 4).

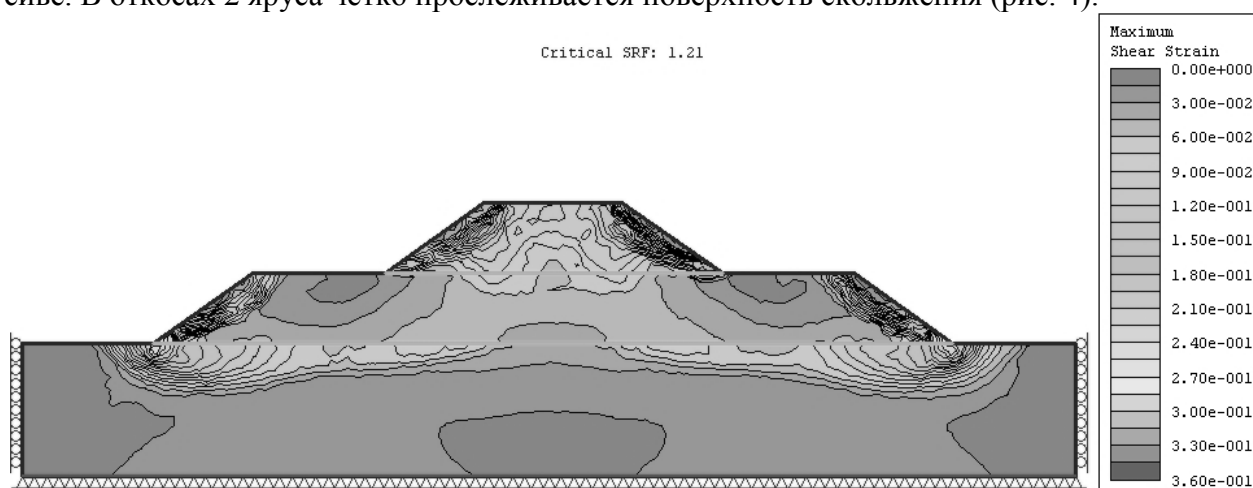


Рис. 4. Нарастание деформаций и возникновение поверхности скольжения в подошве отвала 2 яруса ($H = 40$ м)

Анализируя вышеприведенные результаты можно сделать вывод, что высота $H = 30$ м является предельной для 2 яруса отвала при заданных углах наклона свежееотсыпанного отвала $\alpha_{\text{отк}} = 35^\circ$ и физико-механических характеристиках пород. Расстояние от края бульдозера до края бровки существенно не влияет на общую устойчивость породного массива в диапазоне $b = 2 \dots 10$ м. Несмотря на относительно малые вариации полученных значений КЗУ = 1,21...1,23 для заданных высот отвала и положения бульдозера на уступе значительные смещения массива и развитие масштабных оползневых процессов возникают при $H = 40$ м. Таким образом, отсыпку 2 яруса рекомендуется производить до $H = 30$ м.

Оценка геомеханической устойчивости отвала на наклонном основании. Для горно-геологических условий разреза «Майкубенский» и особенностей технологии отработки угольных пластов применение технологии внутреннего отвалообразования является экономически целесообразным инженерным решением. При этом, узким местом данной технологии применительно к горно-геологическим условиям разреза является наклонное залегание

пластов полезного ископаемого. Выработанное пространство разреза также имеет полого-наклонный профиль и складирование вскрышных пород на наклонное основание может привести к неустойчивому состоянию отвалов.

В связи с этим выполнение численного моделирования и оценки геомеханической устойчивости отвала на наклонном основании является важным этапом для применения технологии внутреннего отвалообразования.

Устойчивость отвала на наклонном основании оценивалась аналогично этапам численного моделирования устойчивости многоярусных отвалов. Для геомеханической оценки принимается расчетная схема с двухъярусным отвалом. При этом, согласно полученным результатам предельная высота 1 яруса рекомендуется не более 40 м, 2 яруса – не более 30 м. В качестве переменных параметров принимаются угол наклона основания отвала β с шагом 5° , положение горнотранспортного оборудования от края бровки b с шагом 2 м, угол наклона откоса отвала α с шагом 5° . Абсолютная высота отвала (расстояние от нижней до верхней бровки) принимается постоянной $h = 40$ м.

На рис. 5 представлен профиль отвала на наклонном основании с углом падения пород $\beta = 5^\circ$ и углом наклона откоса отвала $\alpha = 15^\circ$. При заданных геометрических параметрах на уровне границы складированных пород и наклонным основанием в области нижней бровки наблюдаются значительные смещения массива $U_x = 2,7 \dots 3,0$ м, которые не зависят от нагрузок от горнотранспортного оборудования на поверхности отвала, а $KЗУ = 1,5$ (рис. 6).

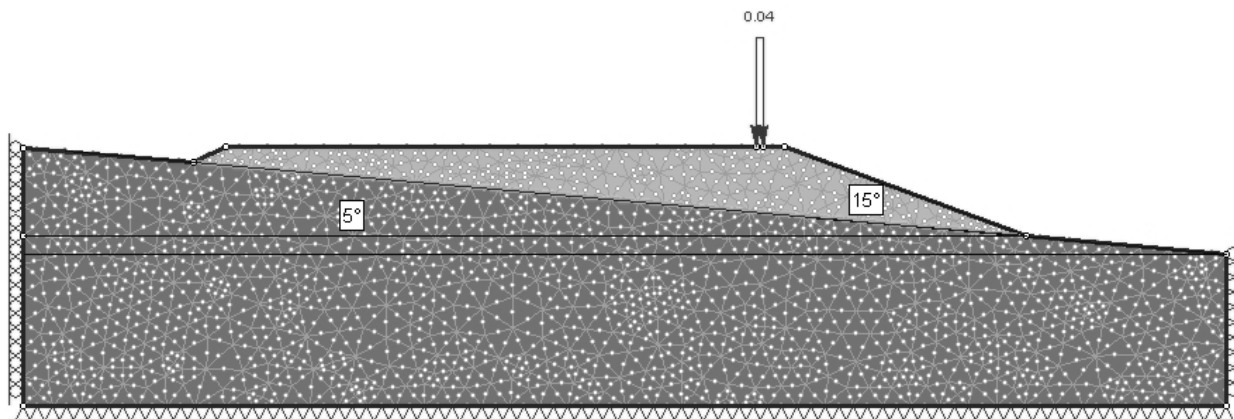


Рис. 5. Профиль отвала на наклонном основании с углом падения пород $\beta = 5^\circ$

При увеличении угла откоса отвала до $\alpha = 20^\circ$ $KЗУ = 1,42$. Горизонтальные смещения $U_x = 2,7 \dots 3,0$ м, которые существенно не зависят от нагрузок от горнотранспортного оборудования на поверхности отвала в диапазоне $b = 2 \dots 10$ м.

При увеличении угла откоса отвала до $\alpha = 30^\circ$ $KЗУ = 1,21$. Смещения возрастают до $U_x = 3,6 \dots 3,8$ м, что свидетельствует об интенсивных оползневых процессах в приоткосной части массива. Деформации на уровне нижней бровки отвала и смещение массива происходит по контакту слоев и обусловлено сползанием отсыпаемых в отвал пород. В результате процесса выполаживания откоса фактический его угол может быть меньше проектного.

При $\alpha = 35^\circ$, $KЗУ = 1,07$. Для заданных физико-механических характеристик отсыпаемых в отвал пород массив неустойчив, а горизонтальные смещения $U_x = 3,0$ м, что свидетельствует об интенсивных оползневых процессах в приоткосной части массива. В результате процесса выполаживания откоса фактический его угол может быть меньше проектного.

На основании полученных результатов устойчивости отвалов на полого-наклонном основании с углом падения пород $\beta = 5^\circ$ можно сделать вывод, что высота 1 яруса отвала по абсолютным отметкам нижней и верхней бровки не должна превышать $h = 40$ м, а угол наклона откоса отвала $\alpha \leq 30^\circ$. Тогда будет обеспечиваться требуемый коэффициент устойчивости отвалов $KЗУ \geq 1,2$.

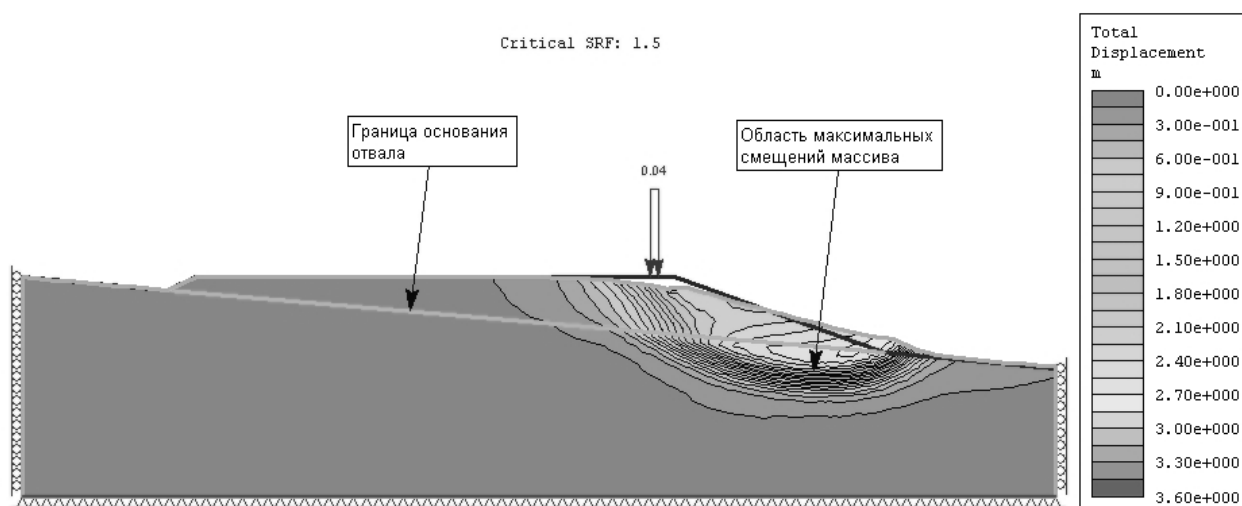


Рис. 6. Смещения в массиве отвала на наклонном основании ($\beta = 5^\circ$, $\alpha = 15^\circ$)

На расстоянии $b = 75$ м от края верхней бровки деформации и смещения массива отсутствуют, поэтому это расстояние необходимо учитывать как проектное расстояние между верхней бровкой 1 яруса и нижней бровкой 2 яруса.

Для построения профиля двухъярусного отвала целесообразно выбрать угол наклона откоса 1 яруса с учетом наклона основания $\alpha_1 \leq 30^\circ$. На рис. 7 показан профиль отвала на наклонном основании с результирующим углом падения пород $\beta = 10^\circ$ и углом наклона откоса отвала 2 яруса $\alpha_2 = 15^\circ$.

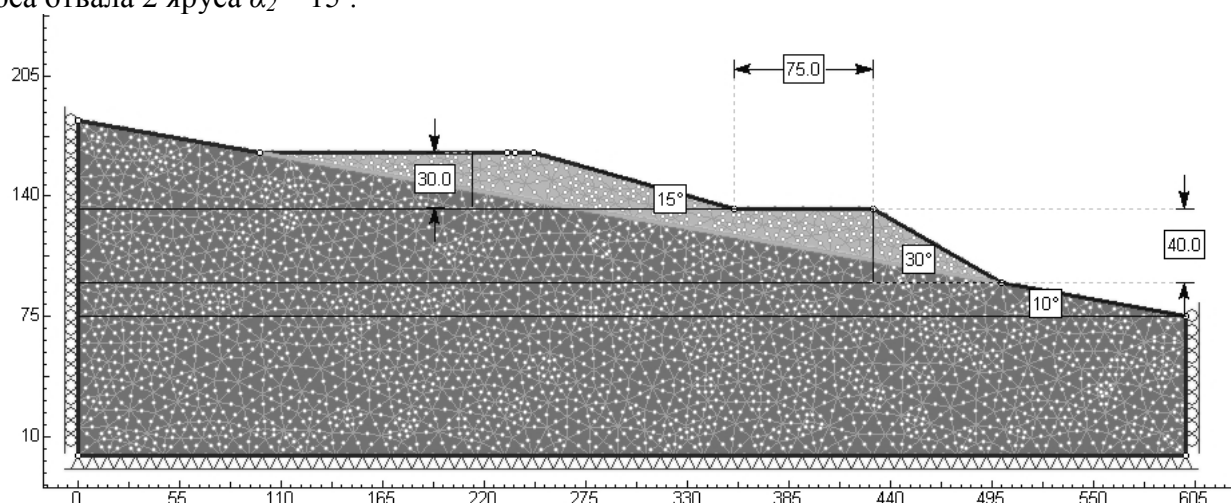


Рис. 7. Профиль 2-ярусного отвала на наклонном основании ($\beta = 10^\circ$, $\alpha_1 = 30^\circ$, $\alpha_2 = 15^\circ$)

Максимальные смещения в массиве $U_x = 3,0 \dots 3,3$ м связаны с нижней бровкой 1 яруса отвала на границе контакта с породами основания. Во 2 ярусе отвала значительных деформаций не наблюдается, а КЗУ = 1,24. Положение горнотранспортного оборудования на уступе не влияет на изменение КЗУ. Аналогичные смещения в отвальном массиве с КЗУ = 1,24 наблюдаются при $\alpha_2 = 20^\circ$.

При возрастании угла наклона 2 яруса до $\alpha_2 = 25^\circ$ картина максимальных смещений в массиве существенно не меняется, $U_x = 3,6 \dots 4,8$ м связаны с нижней бровкой 1 яруса отвала. Во 2 ярусе отвала значительных деформаций не наблюдается, а КЗУ = 1,23.

Нарастание сдвиговых деформаций в массиве (рис. 8), связанное с изменением крутизны откоса 2 яруса отвала до $\alpha_2 = 30^\circ$ и нагрузкой от горнотранспортного оборудования инициирует деформационные процессы в породном массиве основания. При этом наблюдается образование масштабной поверхности скольжения, которая распространяется в породах основания отвала, а КЗУ = 1,21, что является предельно допустимым значением.

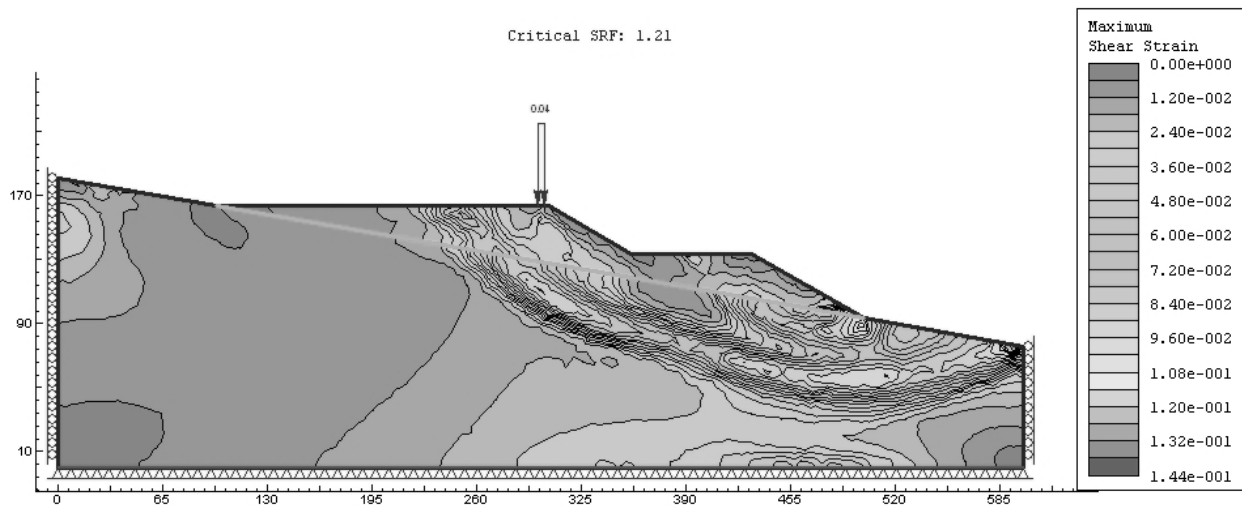


Рис. 8. Максимальные сдвиговые деформации в массиве для 2-ярусного отвала на наклонном основании с углом падения пород ($\beta=10^\circ$, $\alpha_1=30^\circ$, $\alpha_2=30^\circ$)

Максимальные смещения во 2 ярусе отвала достигают значений $U_x = 2,0 \dots 2,5$ м, что свидетельствует об интенсивных оползневых процессах в массиве.

Таким образом, формирование 2 яруса внутреннего отвала с углом наклона $\alpha_2 > 30^\circ$ не рекомендуется, что связано с предельной устойчивостью объекта. При обосновании необходимости складирования вскрышных пород в выработанном пространстве карьера формирование 3 яруса отвала возможно выше уровня дневной поверхности с бермой безопасности $b = 75$ м.

Выводы. Для горно-геологических условий разреза «Майкубенский» и особенностей технологии отработки угольных пластов применение технологии внутреннего отвалообразования является экономически целесообразным инженерным решением. При отработке месторождения выработанное пространство разреза также имеет полого-наклонный профиль и складирование вскрышных пород на наклонное основание может привести к неустойчивому состоянию отвалов. Выполненный анализ геомеханической устойчивости внутренних отвалов посредством численного моделирования в программе конечно-элементного анализа *Phase2* позволил установить оптимальные геометрические параметры внутреннего отвала на полого-наклонном основании.

Установлено, что для отвала на пологом основании высота $H = 40$ м является предельной для первого яруса внутреннего отвала при заданных углах наклона свежеотсыпанного отвала $\alpha_{отк} = 35^\circ$. Предельная высота первого яруса отвала на пологом основании $H \leq 40$ м, для 2 яруса $H \leq 30$ м.

При размещении внутренних отвалов на полого-наклонном основании ($\beta \leq 10^\circ$) высота 1 яруса по абсолютным отметкам нижней и верхней бровки не должна превышать $h = 40$ м, а угол наклона откоса отвала $\alpha_1 \leq 30^\circ$, что обеспечит требуемый КЗУ $\geq 1,2$. Высота 2 яруса отвала не должна превышать $h = 30$ м, а угол наклона откоса отвала $\alpha_2 \leq 30^\circ$.

Список литературы

1. Зайцева А.А. Внутренний отвал на наклонном основании и его приемная способность. ГИАБ, М. : 2004., с. 205-209.
2. Гальперин А.М. Геомеханика открытых горных работ - М. : Изд-во Московского государственного горного университета, 2003. - 473 с.
3. Разработать рекомендации по устойчивым параметрам элементов геомеханических конструкций на разрезе «Майкубенский» с переходом на внутреннее отвалообразование». Отчет о НИР (промежуточный), Караганда, РКП КазНИИБГП, 2001 г. – 98 с.
4. Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов строящихся и эксплуатируемых карьеров.– Л: ВНИМИ, 1972 г. – 162 с.