

УДК 622.271

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ КАРЬЕРА И ОТВАЛА В ПРОГРАММАХ SLIDE2 И PHASE2

Мокешова А.Т.

Институт машиноведения, автоматики и геомеханики НАН КР

Данная статья посвящена сравнительному анализу устойчивости откосов в горнотехническом комплексе (карьер и отвал) с использованием двух ключевых программных продуктов от Rocscience: Slide2 (Метод Предельного Равновесия, МПР) и Phase2 (RS2) (Метод Конечных Элементов, МКЭ).

Ключевые слова: Метод Предельного Равновесия (МПР), Метод Конечных Элементов (МКЭ), смещения, сдвиг, деформационные свойства.

КАРЬЕРДЫН ТУРУКТУУЛУГУН ЖАНА КАЛПТЫ САНДЫК SLIDE2 ЖАНА PHASE2 ПРОГРАММАЛАРЫНДА МОДЕЛДӨӨ

Мокешова А. Т.

КР УИА Машина таануу, автоматика жана геомеханика институту

Бул макала тоо-кен техникалык комплексиндеги (карьер жана отвал) эки негизги программалык продуктуларды колдонуу менен тоо-кен техникалык комплексиндеги (карьер жана отвал) жантаймалардын туруктуулугун салыштырма талдоого арналган чектүү тең салмактуулук ыкмасы (МПР) жана чектүү элемент ыкмасы (МКЭ).

Баштапкы сөздөр: чектүү тең салмактуулук ыкмасы (МПР), чектүү элемент ыкмасы (МКЭ), жылышуу, деформация касиеттери.

NUMERICAL MODELING OF QUARRY AND DUMP STABILITY IN SLIDE2 AND PHASE2 PROGRAMS

Mokeshova A.

Institute of Mechanical Engineering, Automation and Geomechanics, National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic

This article is devoted to a comparative analysis of the stability of slopes in a mining complex (quarry and dump) using two key software products from Rocscience: Slide2 (Limit Equilibrium Method, LEM) and Phase2 (RS2) (Finite Element Method, FEM).

Keywords: Limit Equilibrium Method (LEM), Finite Element Method (FEM), displacement, shear, deformation properties.

В геотехнической инженерии анализ устойчивости откосов является критически важной задачей для обеспечения безопасности и надежности земляных сооружений, таких как отвалы, насыпи, дамбы и открытые горные выработки.[1] Для выполнения таких расчетов широко используются специализированные программные комплексы [3],[4]. Программы **Slide2** и **Phase2**, также известная как RS2 от Rocscience являются одними из наиболее популярных инструментов, но они базируются на **различных численных методах**, что обуславливает их различия в возможностях и применении. В данной статье представлено сравнение этих двух программ для анализа устойчивости карьера и отвала.

Основное различие между Slide2 и Phase2 кроется в их базовом численном методе:

1. Slide2 (Метод Предельного Равновесия - МПР):

- Slide2 использует **Метод Предельного Равновесия (МПР)** (Limit Equilibrium Method - LEM) для расчета коэффициента запаса устойчивости (FS).
- Этот метод предполагает заранее заданную форму поверхности скольжения и рассматривает равновесие жесткого тела (блока) или системы вертикальных/наклонных призм (секций).
- Программа ищет **критическую поверхность скольжения**, которая дает наименьший коэффициент запаса устойчивости.

- **Преимущества МПР:** Относительная простота, высокая скорость расчетов, традиционно используется в инженерной практике. Подходит для быстрой оценки FS в статическом или псевдостатическом (для сейсмики) состоянии.
- **Ограничения МПР:** Не позволяет напрямую рассчитать **деформации** (перемещения). Расчет основан на предположениях о силах между секциями, которые могут влиять на результат.

2. Phase2 (Метод Конечных Элементов - МКЭ):

- Phase2 (RS2) использует **Метод Конечных Элементов (МКЭ)** (Finite Element Method - FEM).
- Устойчивость откосов в Phase2 чаще всего оценивается с помощью **Метода Снижения Прочности (МСП)** (Shear Strength Reduction - SRM).
- МСП постепенно уменьшает прочностные характеристики грунта (сцепление c и угол внутреннего трения ϕ) до тех пор, пока система не достигнет предела прочности или не произойдет неконтролируемое увеличение деформаций, а полученный коэффициент снижения прочности и будет критическим FS.
- **Преимущества МКЭ/МСП:** Позволяет определить не только FS, но и **напряженно-деформированное состояние** массива, включая **перемещения** и **зоны пластического течения (разрушения)**. Позволяет моделировать сложные условия нагружения и поведение материалов. Может выполнять динамический анализ (в отличие от Slide2, который ограничен псевдостатическим).
- **Ограничения МКЭ/МСП:** Требуется больше вычислительных ресурсов и времени. Результаты FS, полученные МКЭ, могут быть **ниже** по сравнению с МПР (по некоторым исследованиям, до 10%).

В данной статье приведены результаты моделирования откоса карьера и отвала. После задания исходных параметров и выбора соответствующих моделей прочности (Мора-Кулона). В обеих программах были заданы физико-механические свойства пород — γ , c , ϕ , E , ν , ψ , и tensile strength.

На рисунках представлены результаты расчетов в программе Phase2: геометрия модели, распределение SRF, горизонтальные и вертикальные деформации.

Ниже представлены рисунки из программы Phase2

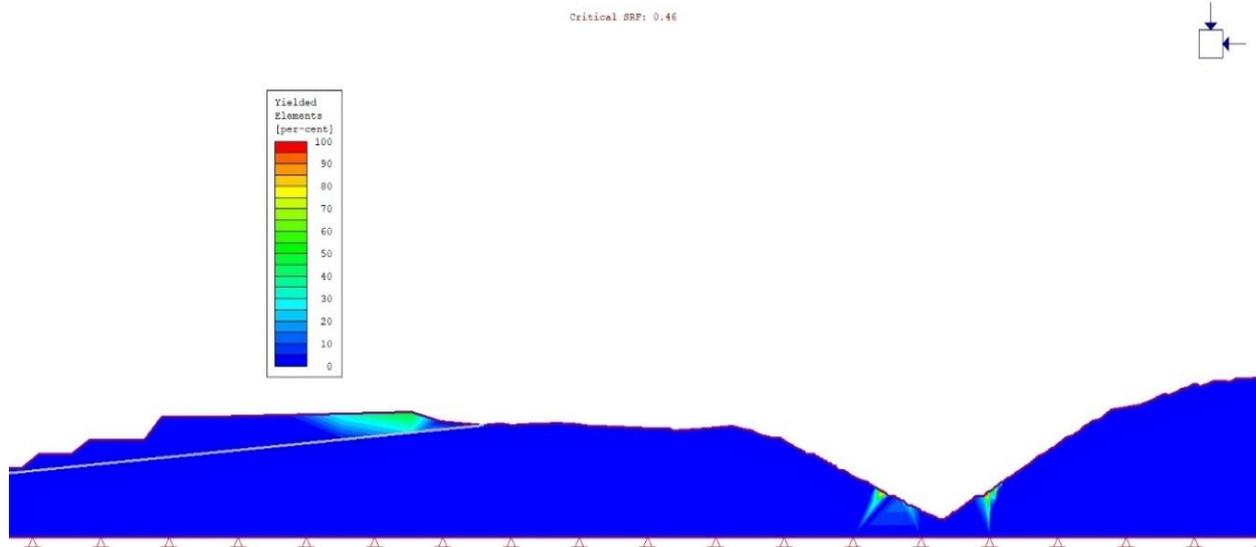


Рис. 1. Зоны пластического течения или разрушения (Отвал и карьер)

На рисунке 1. видно локальное разрушение (красные и оранжевые зоны) в верхней части правого откоса карьера и в зоне отвала слева. Это указывает на потенциальную нестабильность в этих областях.

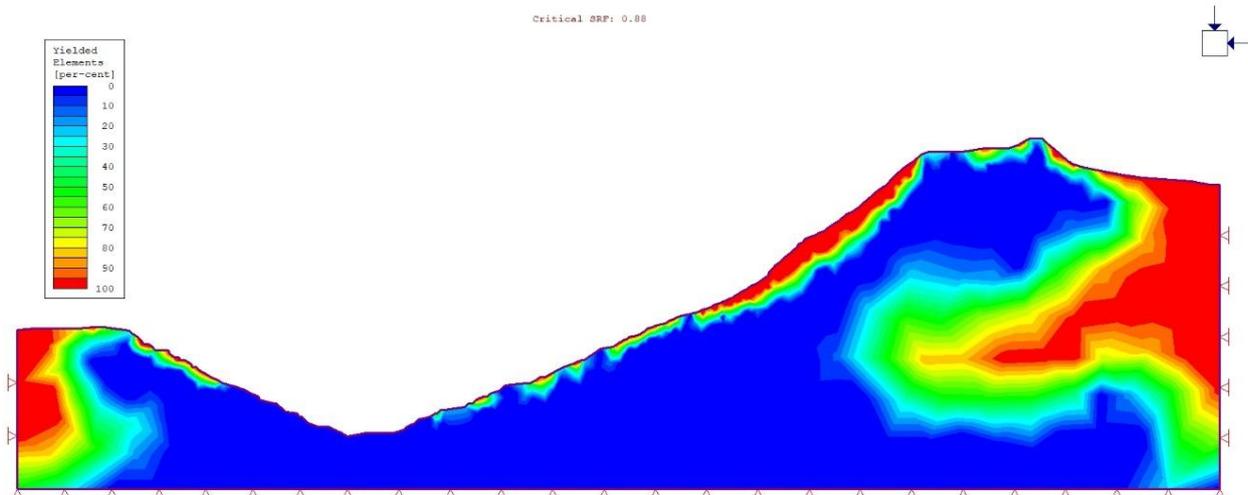


Рис. 2. Зоны пластического течения или разрушения (Карьер).

В верхней части рисунка 2. указан Critical SRF: 0.88. Это значение эквивалентно коэффициенту запаса устойчивости (FS). Поскольку 0.88 меньше 1.0, это указывает на неустойчивое состояние откоса и высокую вероятность его разрушения.

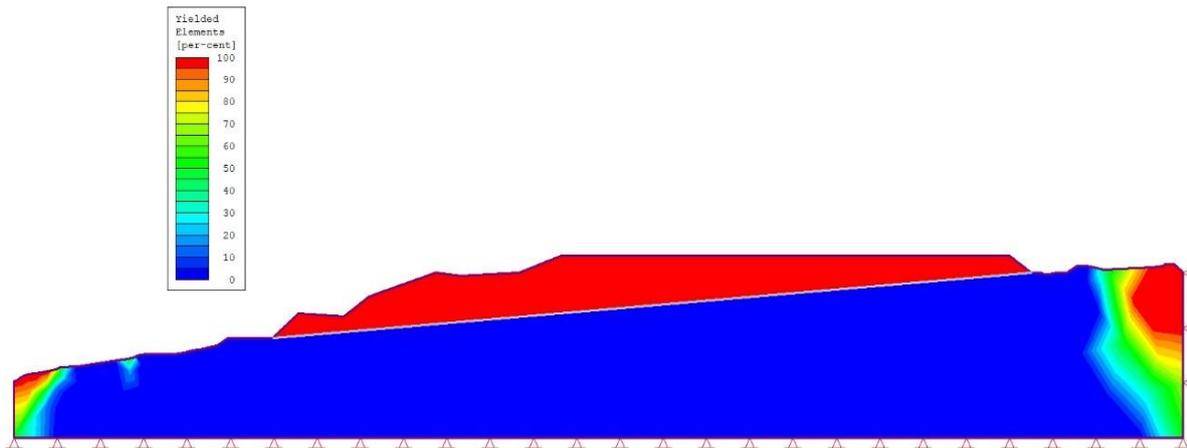


Рис. 3 Зоны пластического течения или разрушения (Отвал).

На рисунке 3. Видна обширная зона разрушения: Видна огромная, сплошная зона, окрашенная в красный цвет (100% разрушенных элементов), которая охватывает практически всю верхнюю часть отвала и простирается от правого края до примерно $X=40750$. Форма обрушения: Эта красная зона четко очерчивает глубокую, плоскую поверхность скольжения, проходящую от подошвы отвала до верхней бровки. Зона покоя: Большая часть массива под поверхностью разрушения остается синей (стабильной), за исключением локальных зон в левом и правом нижних углах, где видно небольшое пластическое течение (голубой/зеленый).

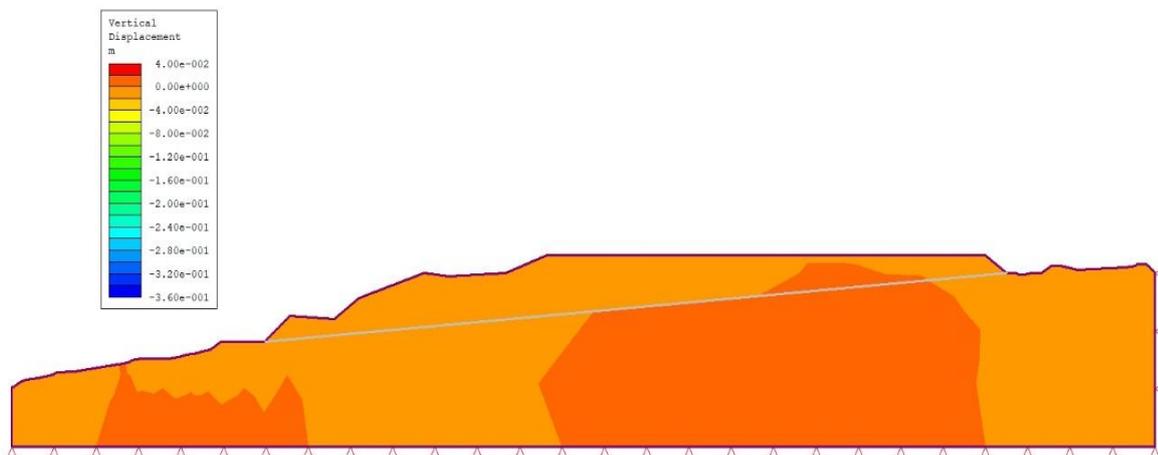


Рис. 4. Вертикальные смещения отвала

Для анализа вертикальных смещений выбран только отвал. Так как отвал — это искусственное насыпное сооружение, состоящее из разрыхленных пород. Главные процессы, влияющие на его стабильность и геометрию, — это: осадка и консолидация и вертикальный сдвиг. После отсыпки материал отвала уплотняется под действием собственного веса, что приводит к значительным вертикальным смещениям вниз (осадке). При достижении критического состояния неустойчивости (Critical SRF = 0.58) разрушение отвала происходит по поверхности скольжения, сопровождаясь проседанием и сопутствующим горизонтальным выдавливанием.

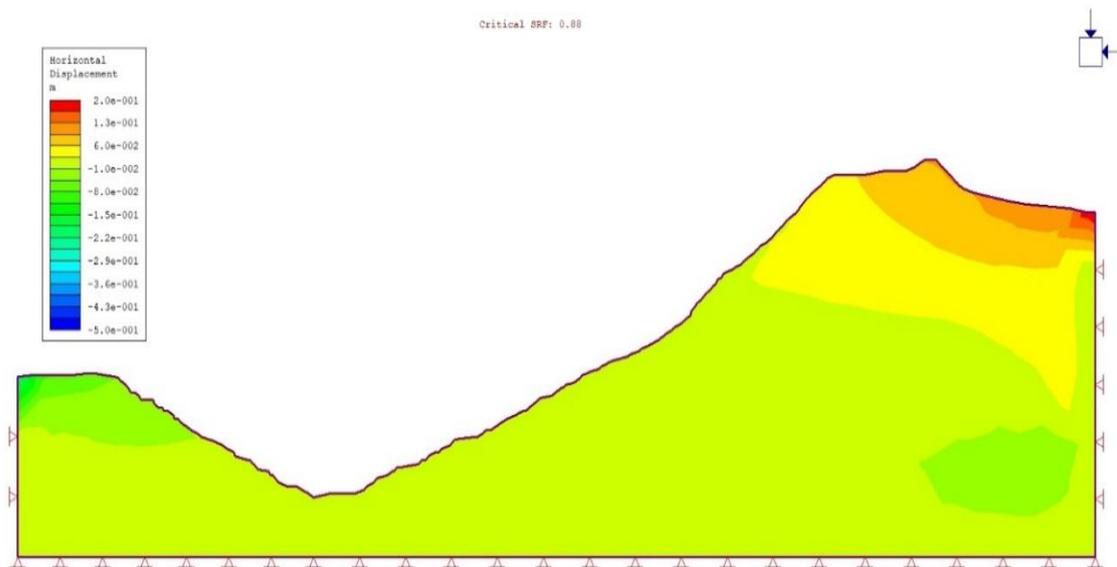


Рис. 5. Горизонтальное смещение карьера

В отличие от отвала, карьер является выемкой в массиве. Для оценки устойчивости откоса карьера (где Critical SRF = 0.88). Основным механизмом разрушения является горизонтальный сдвиг, поэтому горизонтальные смещения более информативны для оценки его стабильности. Наблюдается обширная зона положительных горизонтальных смещений (движение влево, в сторону выемки) по всей поверхности откоса.

На рисунках представлены результаты расчетов в программе Slide 2: геометрия модели, коэффициент запаса устойчивости, призма обрушения.

Ниже представлены рисунки из программы Slide 2

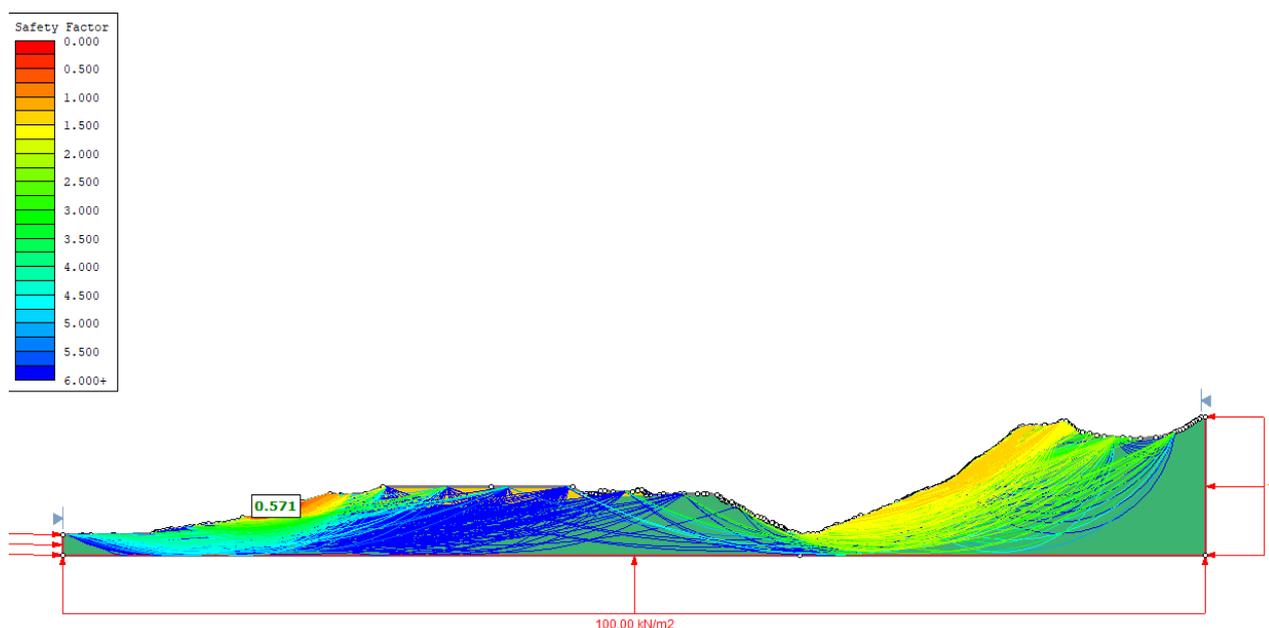


Рис. 6. Метод Предельного Равновесия (МПР) отвала и карьера.

Рисунок 6. является результатом анализа устойчивости откосов методом Предельного Равновесия (МПР), выполненным в программе Slide2. Оно показывает комбинированный профиль, включающий отвал (слева) и склон/массив (справа).

Левая часть (Отвал): Выделена поверхность с минимальным $FS=0.571$. Это значение значительно ниже 1.0, что указывает на крайне неустойчивое состояние насыпного тела.

Правая часть (Массив/Склон): Показан $FS=3.115$. Это значение намного выше 1.0, что свидетельствует о высокой устойчивости массива на этом участке. Вокруг критической поверхности ($FS=0.571$) сконцентрировано большое количество пробных поверхностей (линии от красного до синего цвета). Это подтверждает, что программа надежно локализовала наиболее опасную, глубокую зону разрушения в теле отвала.

Результат подтверждает, что основным источником риска в данном горнотехническом комплексе является отвал.

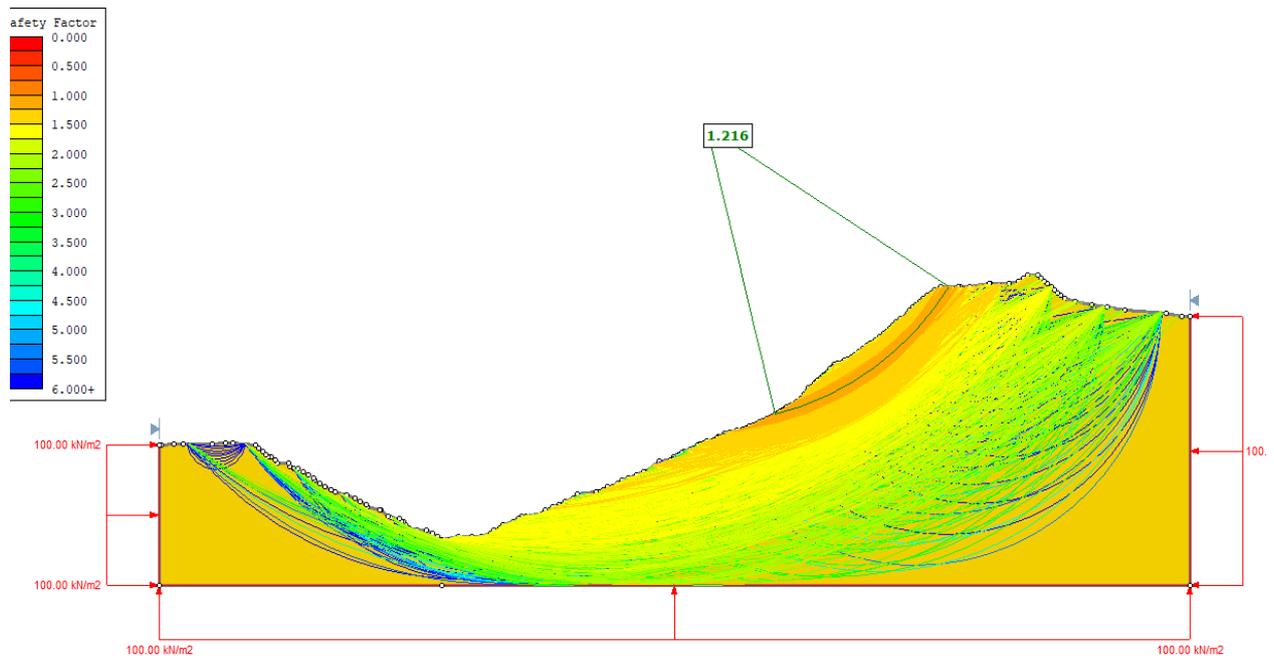


Рис. 7. Метод Предельного Равновесия (МПР) карьера.

Показано множество испытанных поверхностей. Критический FS (1.216) больше 1.0, что указывает на условно устойчивое состояние откоса по критерию предельного равновесия.

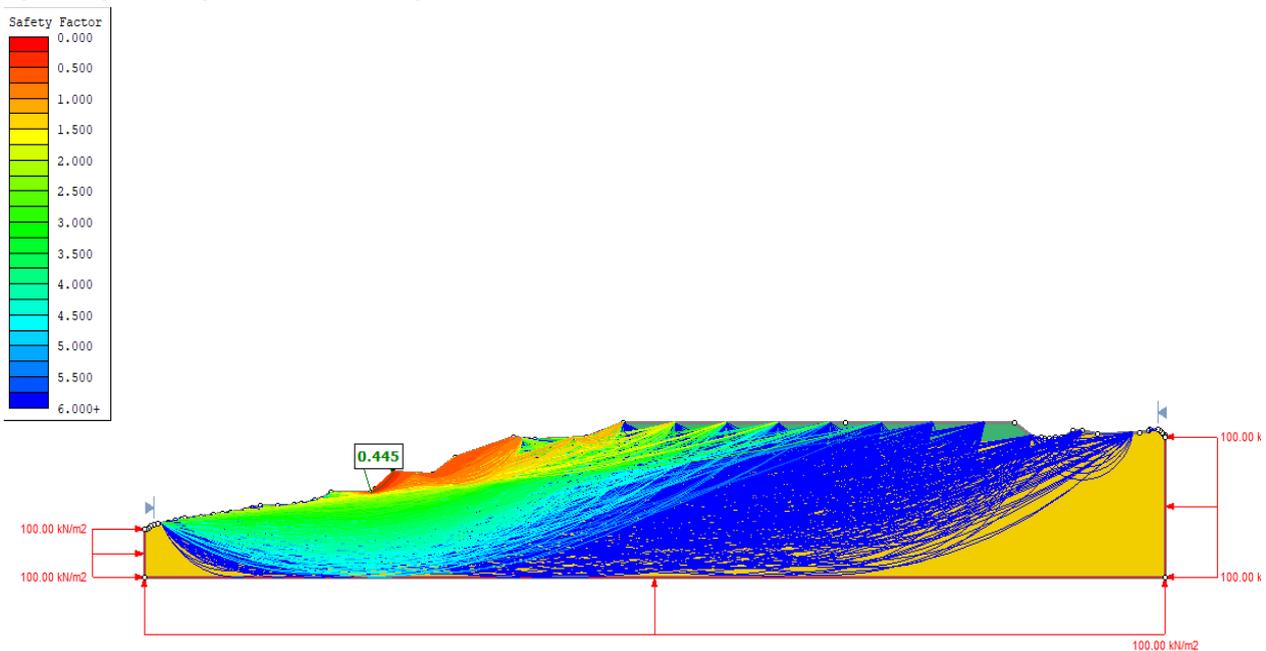


Рис. 8. Метод Предельного Равновесия (МПР) отвала.

На рисунке 8. Видна небольшая локальная зона разрушения в верхней части отвала (зеленый/желтый цвет) и мелкие зоны в подошве карьера. Критический SRF = 0.46 указывает на неустойчивость всей

системы, но зона разрушения здесь менее развита, чем в отдельной секции отвала.

Сравнение Slide2 и Phase2

Сравнительный анализ устойчивости горнотехнического комплекса, включающего отвал и карьер, с использованием Метода Предельного Равновесия (МПР) в Slide2 и Метода Конечных Элементов (МКЭ) в Phase2 (SRM) выявил как согласованность в критических зонах, так и существенные различия в оценке риска, а также предоставил разный объем информации о механизме разрушения.

Согласованность. Обе программы единогласно определили отвал как главный источник риска в горнотехническом комплексе. Результат для комбинированного профиля также критичен ($FS=0.571$ и $SRF=0.46$), что подтверждает острую необходимость в немедленных стабилизационных мероприятиях для отвала.

Расхождения. Наиболее существенное различие между методами наблюдается при анализе откоса карьера. Slide2 (МПР), основанный на статическом равновесии сил, счел откос устойчивым, получив $FS=1.216$. Phase2 (МКЭ), учитывающий фактические напряжения и деформации, выявил неустойчивое состояние, получив $SRF=0.88$. Это расхождение является критическим: МКЭ обнаружил скрытый риск, проигнорированный МПР. В подобных случаях, когда FS по МПР близок к 1.0, результат МКЭ считается более консервативным и надежным, поскольку он подтвержден развитием зон пластического течения в массиве.

Преимущество МКЭ в Описании механизма

Phase2 (МКЭ) предоставляет значительно более полную и физически обоснованную информацию о механизме разрушения, которая отсутствует в Slide2.

Для Отвала: Phase2 показал, что неустойчивость проявляется через глобальный сдвиг, сопровождающийся масштабной осадкой (вертикальные смещения) до 36 см, что является прямым следствием потери прочности насыпного тела.

Для Карьера: МКЭ наглядно показал, что неустойчивость откоса вызвана массовым горизонтальным выдавливанием всей толщи склона в сторону выемки, подтвержденным обширной зоной пластического течения.

В то время как Slide2 полезен для быстрой первичной оценки и подтверждения критического состояния отвала, Phase2 является незаменимым инструментом для детального анализа, поскольку он точно

определяет фактический механизм разрушения, выявляет скрытые риски (как в случае карьера) и предоставляет количественные данные о деформациях, необходимые для проектирования мер по стабилизации.

Выводы

В работе проведён сравнительный анализ результатов моделирования устойчивости откосов в программах Phase2 и Slide2. Обе программы показали схожие тенденции в распределении зон деформаций и коэффициентов устойчивости, однако Phase2 позволяет более детально учитывать напряжённо-деформированное состояние массива. Проведённое сравнение подтвердило, что использование обеих программ повышает достоверность оценки устойчивости склонов и качества инженерных решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Саньков, А. В., Маслов, Б. А. Численное моделирование в геотехнике: Учебное пособие. Москва: Издательство МГУ, 2018. (Общие сведения о МКЭ и МПР в геотехнике).
2. Григорьев, В. М. Устойчивость откосов и методы ее обеспечения. Санкт-Петербург: Недра, 2015.
3. Duncan, J. M., Wright, S. G. Soil Strength and Slope Stability. New York: John Wiley & Sons, 2005. (Классический труд по устойчивости склонов).
4. Zienkiewicz, O. C. The Finite Element Method. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000. (Основы метода конечных элементов).
5. Rocscience Inc. Slide2: 2D Limit Equilibrium Slope Stability Analysis – User’s Guide. Toronto: Rocscience Inc., 2024.
6. Rocscience Inc. Phase2 (RS2): 2D Finite Element Analysis for Geotechnical Engineering – User’s Guide. Toronto: Rocscience Inc., 2024.