

УДК 622.271.4

АНАЛИЗ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ОТВАЛОВ НА НАГОРНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ

Асилова Зульфия Атамырзаевна¹, Джакупбеков Белек Торокулович²¹Жалал-Абадский международный университет, Кыргызская Республика²Институт машиноведения, автоматики и геомеханики НАН КР, Кыргызская Республика

Аннотация

В данной статье рассматриваются численные методы моделирования и оценки устойчивости отвалов, что является важной задачей в горном деле и инженерной геотехнике. Приведены современные подходы к численному моделированию, включая метод конечных элементов (МКЭ) и метод конечных разностей (МКР), позволяющие учитывать сложные геомеханические процессы. Описаны критерии устойчивости отвалов и параметры, влияющие на их стабильность, такие как физико-механические свойства грунтов, угол наклона и внешние нагрузки. Проведен сравнительный анализ использования программного обеспечения, а также предложены рекомендации по применению программного продукта для прогнозирования возможных деформаций и предотвращения аварийных ситуаций. Полученные результаты могут быть полезны при проектировании и эксплуатации горнотехнических объектов.

Ключевые слова: Численное моделирование, устойчивость отвалов, метод конечных элементов (МКЭ), метод конечных разностей (МКР), деформации грунтов

ANALYSIS OF NUMERICAL METHODS FOR MODELING AND ASSESSING THE STABILITY OF WASTE DUMPS IN HIGHLAND DEPOSITS

Zulfiya Atamyrzaevna Asilova¹, Dzhakupbekov Belek Torokulovich²¹Jalal-Abad International University, Kyrgyz Republic²Institute of Machine Science, Automation, and Geomechanics of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic (NAS KR), Kyrgyz Republic

Abstract

This article examines numerical methods for modeling and assessing the stability of waste dumps, which is a critical task in mining and geotechnical engineering. Modern approaches to numerical modeling are presented, including the Finite Element Method (FEM) and the Finite Difference Method (FDM), which allow for the consideration of complex geomechanical processes. The criteria for waste dump stability and the parameters affecting their stability, such as the physical and mechanical properties of soils, slope angle, and external loads, are described. A comparative analysis of software applications is conducted, and recommendations are provided for using software tools to predict potential deformations and prevent emergency situations. The obtained results can be useful in the design and operation of mining facilities.

Keywords: Numerical modeling, waste dump stability, Finite Element Method (FEM), Finite Difference Method (FDM), soil deformations

to freely distribute the published article, with the obligatory reference to the authors of original works and original publication in this journal.

Correspondence: Zulfia Atamyrzaevna Asilova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Jalal-Abad International University, Jalal-Abad, Kyrgyzstan, Email: aslova.zulfiya@mai.ru

Введение

Развитие горнодобывающей промышленности требует внедрения современных методов анализа и прогнозирования устойчивости горных массивов и отвалов. Одним из наиболее эффективных подходов является численное моделирование, позволяющее учитывать сложные геомеханические процессы, протекающие в массиве горных пород.

Проблема устойчивости отвалов особенно актуальна при разработке нагорных месторождений, так как нарушение их устойчивости может привести к обрушениям, деформациям и аварийным ситуациям, наносящим значительный экономический и экологический ущерб. Поэтому использование точных и надежных методов оценки устойчивости является важной задачей при проектировании и эксплуатации нагорных объектов.

Современные численные методы, такие как метод конечных элементов (МКЭ) [1] и метод конечных разностей (МКР) [2], позволяют учитывать различные физико-механические свойства горных пород, гидрогеологические условия и внешние нагрузки. Эти методы находят широкое применение в геотехническом анализе, помогая исследовать влияние различных факторов на устойчивость склонов и отвалов.

В данной статье рассматриваются основные подходы к численному моделированию массивов, анализируются факторы, влияющие на устойчивость отвалов, и предлагаются рекомендации по применению современных методов оценки устойчивости в горнотехнической практике.

Основная часть

Численное моделирование является мощным инструментом для анализа устойчивости массивов и отвалов. Оно позволяет учитывать сложные геомеханические процессы, прогнозировать возможные деформации и разрабатывать меры по их предотвращению. В современной практике используются следующие основные методы:

1. Метод конечных элементов (МКЭ)- это метод является одним из наиболее распространенных в инженерной геотехнике. Он позволяет дискретизировать расчетную область на конечные элементы (треугольные, четырехугольные, тетраэдрические и др.), что делает возможным моделирование сложных геометрий и физических свойств пород [1].

Преимуществами метода являются: высокая точность расчетов при наличии сложных геологических условий; возможность учета нелинейного поведения материалов (пластичность, трещиноватость); гибкость в моделировании сложных моделей, включая динамические воздействия.

Недостатками являются: требовательность к вычислительным ресурсам; необходимость детального задания параметров пород.

2. Метод конечных разностей (МКР)- это метод который применяется для численного решения дифференциальных уравнений, описывающих механическое поведение горных пород. Он используется в программных комплексах, таких как FLAC3D, и позволяет моделировать процессы в условиях больших пластических деформаций [2].

Преимущества: простота реализации и высокая скорость вычислений; хорошая адаптация к задачам моделирования динамических процессов; возможность учета изменения свойств пород во времени.

Недостатками являются свойства как: менее точное моделирование сложных границ и неоднородностей по сравнению с МКЭ; ограниченные возможности для анализа сложных конструкций.

3. Метод дискретных элементов (МДЭ)- это метод который применяется для моделирования поведения раздробленных и сыпучих материалов. Он основан на рассмотрении отдельных частиц горных пород, взаимодействующих между собой. Данный метод эффективен при анализе трещиноватых массивов и отвалов [3].

Преимуществами являются свойства как: подходит для моделирования разрушения и обрушения пород; учитывает взаимодействие частиц и формирование трещин; позволяет анализировать динамические процессы, такие как сейсмическое воздействие.

Недостатки: высокая вычислительная сложность; требует большого количества входных параметров для точного моделирования.

4. Гибридные методы. В практике инженерных расчетов часто применяется комбинация нескольких численных методов. Например, совмещение МКЭ и МДЭ позволяет учитывать, как сплошные, так и дискретные свойства массива, что дает более точные прогнозы устойчивости [1, 3].

Анализ факторов, влияющих на устойчивость отвалов показывает, что устойчивость отвалов горных пород является одной из основных проблем в горном деле и геотехнике. Нарушение устойчивости может привести к обрушениям, деформациям и значительным экологическим и экономическим последствиям. Рассмотрим основные факторы, влияющие на устойчивость отвалов.

Геологические и геотехнические факторы, которые определяют механическое поведение грунтов и пород, формирующих отвалы. К этим факторам относятся физико-механические свойства пород (плотность и пористость, прочностные и сдвигающие характеристики, структурная неоднородность и трещиноватость пород), минеральный состав пород, гидрогеологические и климатические условия

Геометрические характеристики как высота отвала, угол наклона склона. Профиль и форма отвала (ступенчатые отвалы более устойчивы, так как снижают нагрузку на нижние слои, пологие откосы позволяют равномерно распределять нагрузки)

Немаловажное значение имеет и внешние нагрузки как вибрация от работы карьерной техники, сейсмические нагрузки и техногенные изменения структур в виде взрывных работ, неравномерная отсыпка.

Современные программные комплексы играют основную роль в инженерной геотехнике, позволяя проводить численный анализ устойчивости откосов, отвалов и других объектов. Основной целью таких расчетов является определение коэффициента запаса устойчивости, который показывает степень надежности конструкции или геотехнического объекта.

Рассмотрим ведущие программные продукты.

PLAXIS - один из самых мощных инструментов для моделирования сложных геотехнических задач, включая оценку устойчивости склонов и отвалов. Программа

основана на методе конечных элементов (МКЭ), что позволяет учитывать нелинейные свойства грунтов, пластические деформации, влияние подземных вод и динамические воздействия [4, 5].

Преимущества: высокая точность моделирования за счет использования сложных грунтовых моделей (Mohr-Coulomb, Hardening Soil, Soft Soil, Cam-Clay и др.); возможность учета гидрогеологических условий и фильтрационных процессов; поддержка двухмерного и трехмерного анализа; гибкость в моделировании внешних нагрузок (вибрации, сейсмика, строительство).

Недостатки: высокая стоимость лицензии; высокие требования к вычислительным ресурсам; требуется квалифицированный пользователь.

GeoStudio (SLOPE/W) - специализированный инструмент для анализа устойчивости склонов, отвалов, дамб и насыпей. Использует метод предельного равновесия (МНР), позволяя рассчитывать коэффициент запаса устойчивости с учетом различных схем разрушения [6, 7].

Преимущества: разнообразие методов расчета (Bishop, Morgenstern-Price, Janbu, Spencer и др.); интуитивно понятный интерфейс и удобство работы; возможность интеграции с другими модулями GeoStudio для комплексного анализа (например, SEEP/W для учета фильтрации); подходит для быстрого расчета устойчивости без сложного численного моделирования.

Недостатки: не учитывает пластические деформации массива (в отличие от МКЭ); ограниченная возможность анализа сложных геометрий.

FLAC3D - мощный инструмент для численного моделирования горных и геотехнических объектов. Использует метод конечных разностей (МКР), который позволяет анализировать поведение массива под действием нагрузок, влияния воды, сейсмических воздействий и других факторов [8].

Преимущества: возможность моделирования крупномасштабных объектов (отвалы, карьеры, тоннели); высокая точность при моделировании пластических деформаций и разрушений; учет динамических и температурных воздействий; гибкость в настройке параметров грунтов и пород.

Недостатки: сложность освоения из-за программного кода (требует написания командных скриптов); высокие вычислительные затраты; стоимость лицензии выше среднего.

Далее мы хотим показать пример решения задачи по проектированию отвала на уже существующем отвале с определенными безопасными параметрами [9, 10].

С помощью программного продукта GeoStudio SLOPE/W получили оцифрованную 3д модель рельефа местности, которую обрабатывали для дальнейшей постройки отвалов вскрышных пород на одном из месторождений (рис. 1.) [11]

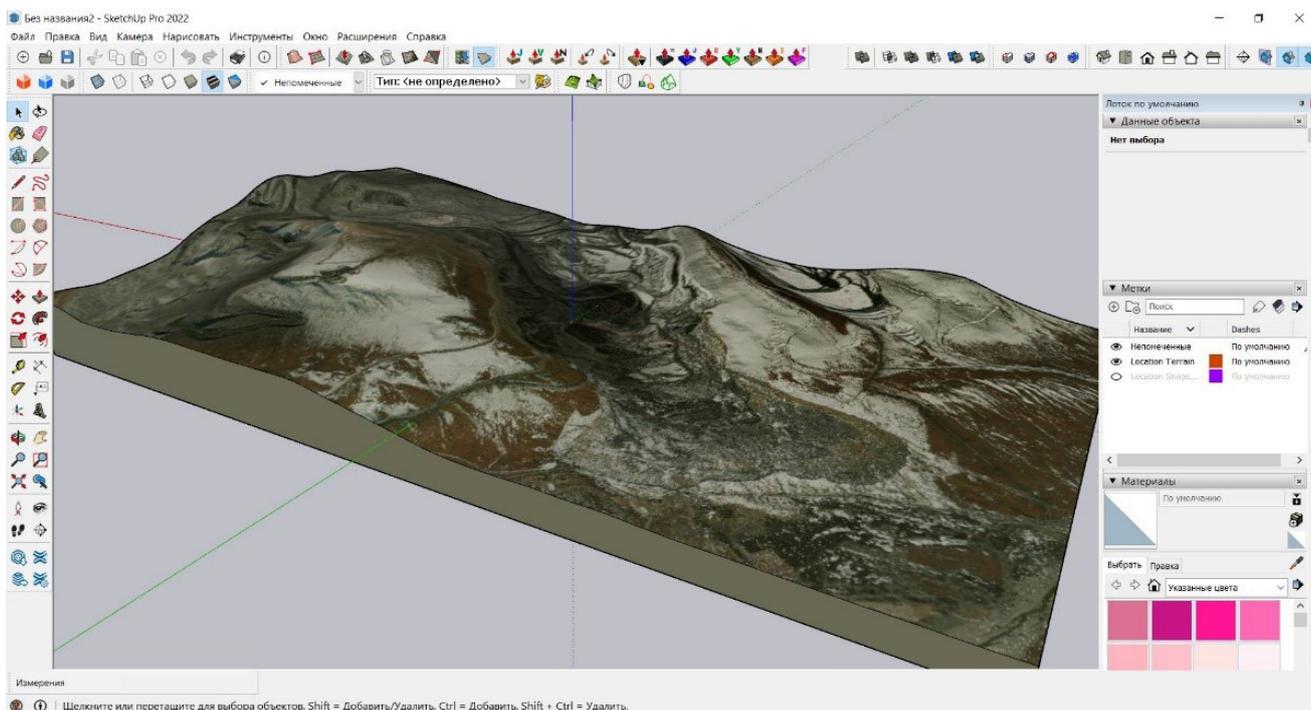


Рисунок 1. Оцифрованное рельеф местности.

При освоении месторождения отвалообразование производится на отведенной площади. Как правило, отгрузка пород каждый год производится на тело уже существующего отвала. При проектировании нового отвала вскрышных пород следует в качестве основания, принять поверхность и свойства уже существующего отвала. На рисунке 2 показана 3Д-модель существующего и проектируемого отвала.

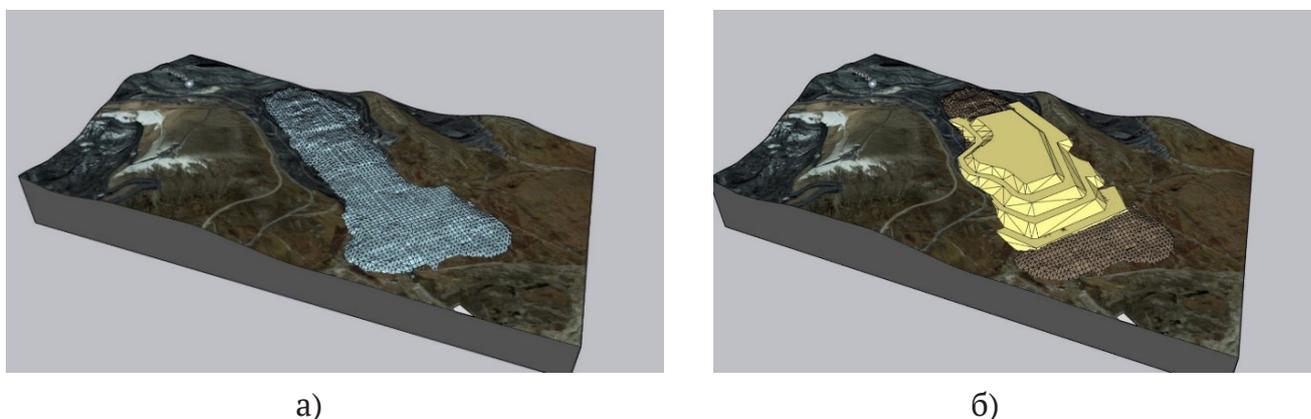


Рисунок 2. Модель существующего (а) и проектируемого (б) отвала.

На существующий отвал был наложен новый отвал с учетом геометрических параметров и несущей способности основания.

Процесс работы с разрезом в масштабе 1:1.

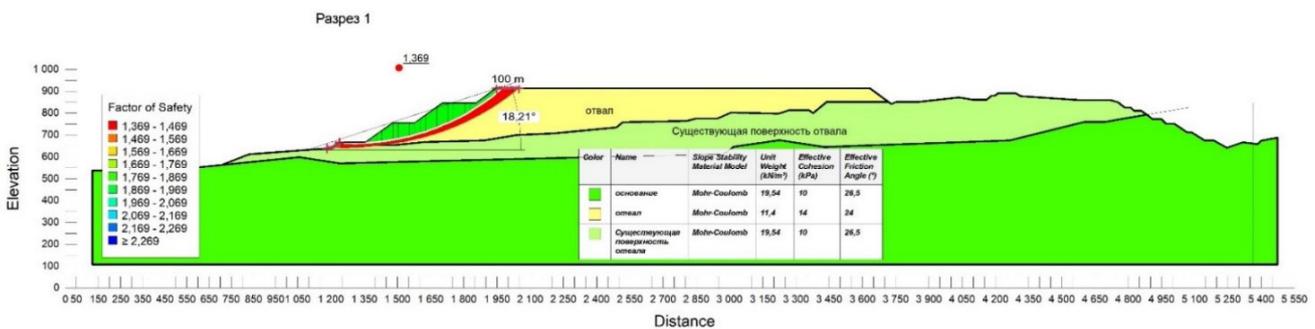
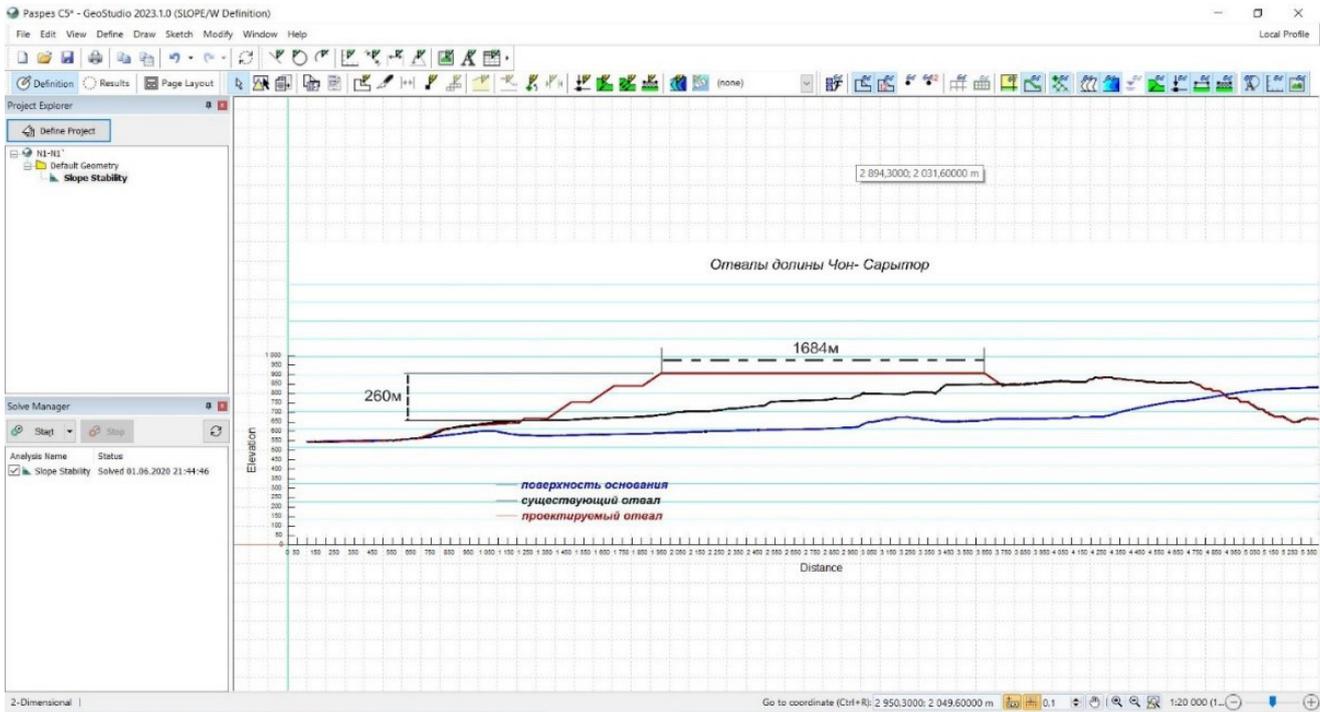


Рисунок 1. 10 Порядок расчета коэффициента устойчивости отвала на склоне. а-разрез отвала; б-результат расчета коэффициента устойчивости с выделением потенциальной поверхности скольжения

Выводы

Выбор метода численного моделирования зависит от конкретных условий задачи: характеристик массива, геологических условий, наличия трещиноватости и динамических воздействий. Метод конечных элементов подходит для детального анализа устойчивости массива, метод конечных разностей – для быстрого анализа динамических процессов, а метод дискретных элементов – для моделирования разрушений. Совмещение нескольких методов позволяет получить более точные результаты и снизить риски при проектировании горнотехнических объектов.

Устойчивость отвалов зависит от множества взаимосвязанных факторов, таких как свойства грунтов, геометрия склона и откосов, наличие внешних нагрузок и климатических условий. Для предотвращения аварийных ситуаций необходимо комплексное моделирование и мониторинг состояния отвалов, использование оптимальных конструктивных решений и применение мер инженерной защиты.

Из анализа использования ведущих программных продуктов по определению коэффициента запаса устойчивости сделаны следующие выводы и рекомендации

- Для быстрого расчета коэффициента устойчивости методом предельного равновесия рекомендуется использовать программу SLOPE/W.
- Для сложных нелинейных расчетов с учетом пластичности и больших деформаций - PLAXIS, FLAC3D
- Для анализа динамических и сейсмических воздействий - FLAC3D
- Для гидрогеологических расчетов в сочетании с устойчивостью склонов - PLAXIS, SLOPE/W.

Выбор программного обеспечения зависит от задач, стоящих перед проектировщиком. В большинстве случаев комбинирование методов (например, МПР и МКЭ) позволяет получить наиболее надежные результаты при анализе устойчивости отвалов и склонов.

Список литературы

1. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике / О Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 542 с.
2. Тихонов, А.Н. Уравнения математической физики / А.Н. Тихонов. - М.: Наука, 1981. -512 с.
3. Чепеленкова, В. Д. Применение метода дискретных элементов для оценки прочностных свойств упругих сред / В. Д. Чепеленкова, В. В. Лисица [Электронный ресурс] DOI 10.33764/2618-981X-2022-2-2-209-214. Режим доступа: file:///C:/Users/User /Downloads/primenenie-metoda-diskretnyh-elementov-dlya-otsenki-prochnostnyh-svoystv-uprugih-sred.pdf
4. Официальный сайт PLAXIS [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.plaxis.com>
5. Качурин, Н. М. Численное геомеханическое моделирование параметров отвала в карьерной выемке с применением драглайна / Н.М. Качурин, Е. В. Курехин // Известия ТулГУ. Науки о Земле. - 2022. - Вып. 4. - С. 367–379.
6. Беляев, Е. Н. Прогнозирование и оценка устойчивости бортов, уступов разрезов и откосов отвалов на каменноугольном месторождении с использованием программных комплексов geostudio и plaxis 3D / Е. Н. Беляев, А. Е. Бурдонов, Н. В. Мурзин // Известия ТулГУ. Науки о Земле. - 2023. - Вып. 1. - С. 138–158.
7. Официальный сайт GeoStudio [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.geoslope.com>
8. Официальный сайт FLAC3D [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.itascacg.com/software/flac3d>
9. Джакупбеков, Б. Т. Определение параметров отвалов на горных склонах с применением программного приложения Google Sketchup/ Б. Т. Джакупбеков // Современные проблемы механики. 2016, № 26 (4). – С. 58-64.
10. Asilova, Z.A. Determination of safe parameters of storage overburden dumps on slopes during the development of upland deposits/ Asilova, Z.A. Kokumbaeva, K.A., Osmonova N.T., Ysenov K.J. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science., 2024, 1374(1), 012030. - С. 1-6.
11. Джакупбеков, Б. Т. Численное моделирование устойчивости отвалов вскрышных пород при освоении нагорных месторождений / Джакупбеков Б.Т., Асилова З. А., Никольская О. В. // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. Новосибирск. 2023. - Том10, № 1. - С. 30-37.

Received / Получено 08.01.2025

Revised / Пересмотрено 22.02.2025

Accepted / Принято 20.03.2025