

ФАКТОР БЕЗОПАСНОСТИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МНОГОЯРУСНОГО ОТВАЛА

Асилова Зульфия Атамырзаевна¹, Джакупбеков Белек Торокулович², Никольская Ольга Викторовна²

¹Жалал-Абадский международный университет, Кыргызская Республика, г. Манас

²Института машиноведения, автоматики и геомеханики НАН КР, Кыргызская Республика, г. Бишкек

Аннотация

В статье представлены результаты численного моделирования устойчивости многоярусных отвалов вскрышных пород, размещённых на склонах нагорных месторождений. Основное внимание уделено влиянию геометрических параметров (высоты отвала и ширины площадки между ярусами и угла отвала) на величину коэффициента безопасности. Расчёты выполнены в программной среде GeoStudio Slope/W с использованием метода Моргенштейн-Прайса. Значения параметров выбраны на основе инженерно-геологических изысканий типичных для условий нагорных месторождений. Установлено, что увеличение ширины площадки между ярусами приводит к росту фактора безопасности за счёт перераспределения напряжений и снижения сдвиговых деформаций. А также установлено, что с увеличением ширины площадки между ярусами уменьшается угол отвала и увеличивается фактор безопасности. Полученные зависимости могут быть использованы при проектировании отвалов в горных условиях для повышения надёжности и снижения техногенных рисков.

Ключевые слова: склон, отвал, ярус, геометрические параметры, численное моделирование, фактор безопасности, устойчивость.

INFLUENCE OF GEOMETRICAL PARAMETERS ON THE SAFETY FACTOR OF A MULTI-TIER WASTE DUMP

Asilova Zulfiya Atamyrzaevna¹, Dzhakupbekov Belek Torokulovich², Nikolskaya Olga Viktorovna²

¹ Jalal-Abad International University, Manas, Kyrgyz Republic

² Institute of Mechanical Engineering, Automation and Geomechanics of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyz Republic

Abstract

This paper presents the results of numerical modeling of the stability of multi-tier waste dumps placed on the slopes of highland deposits. The main focus is on the influence of geometrical parameters—such as dump height, berm width between tiers, and slope angle—on the value of the safety factor. Calculations were carried out using the GeoStudio Slope/W software based on the Morgenstern-Price method. The parameter values were selected based on engineering and geological investigations typical for highland mining conditions. It was established that increasing the berm width between tiers leads to a higher safety factor due to stress redistribution and a reduction in shear deformations. It was also found that as the berm width increases, the dump slope angle decreases, resulting in improved overall stability. The obtained relationships can be applied in the design of waste dumps under mountainous conditions to enhance reliability and reduce technogenic risks.

Keywords: slope, dump, tier, geometrical parameters, numerical modeling, safety factor, stability.

Введение

Разработка нагорных месторождений открытым способом сопровождается формированием крупных отвалов вскрышных пород, размещаемых на склоне. В отличие от равнинных условий, нагорные территории характеризуются сложной геоморфологией, сейсмической активностью и специфическими гидрогеологическими условиями, что существенно осложняет обеспечение устойчивости отвалов.

Нарушение устойчивости отвалов могут приводить к масштабным техногенным последствиям: оползням, разрушению инфраструктуры, перегораживанию русел рек и, как следствие, — угрозе жизням людей и ухудшению экологической обстановки. Известны случаи катастрофических обрушений отвалов, зафиксированные в мировой горной практике [1–3].

Оценка устойчивости являются наиболее распространенным типом численного анализа в проектировании горнодобывающей отрасли. При этом важным вопросом является определение устойчивости отвалообразования на склоне в зависимости от геометрических параметров. [2]

Традиционные методы расчёта устойчивости, хотя и находят широкое применение, часто оказываются недостаточными для сложных нагорных условий, где требуется учет взаимодействия между геометрическими параметрами отвала и рельефом местности. В связи с этим растёт роль численного моделирования, так как она даёт более точную оценку состояния склона и отвала [4–6].

Особое внимание в отвалообразовании вскрышных пород уделяется влиянию геометрических параметров отвала на их стабильность. Результаты работы Kolapo и др. [1] показывают, что увеличение высоты отвала и крутизны склона резко снижает коэффициент устойчивости, тогда как расширение отвалов способствует перераспределению напряжений и повышению их стабильности. Аналогичные выводы приводятся в исследованиях Гальперина А.М. Кутепова Ю.И., Еремина Г.М. [5], акцентирующих важность оптимизации геометрии отвалов на нестабильных склонах.

Наиболее широко используемый практический подход для анализа устойчивости склона это 2D моделирование, в масштабе путем вычисления его предельного равновесия, для которого начальные условия больше $K_u > 1$. Однако со временем возникают определенные процессы или события (увеличение объёма отвала, ливни, землетрясения и т. д.), которые имеют тенденцию дестабилизировать отвал, временно или навсегда уменьшая устойчивость отвала вскрышных пород.

Таким образом, необходимостью для определения повышения надёжности проектирования отвалов вскрышных пород в сложных горно-геологических условиях, является проведение целенаправленного численного анализа влияния геометрических параметров на фактор безопасности. Так как анализ чувствительности к изменениям параметров важен для оценки надёжности результатов. Необходимо также сопоставлять полученные результаты с инженерным опытом и другими данными.

Целью анализа проведенной работы является установление зависимости между геометрическими параметрами многоярусного отвала вскрышных пород (шириной

площадки между ярусами, общим углом наклона) и коэффициентом устойчивости при размещении на склонах в условиях высокогорных месторождений.

Для достижения поставленной цели в статье решаются следующие задачи:

- Выполнение численного моделирования устойчивости отвалов методом конечных элементов в программной среде GeoStudio Slope/W;
- Оценка влияния ширины площадки между ярусами отвала на значение коэффициента безопасности;
- Определение критической поверхности скольжения для различных геометрических конфигураций отвала;
- Расчет коэффициента запаса прочности (фактора безопасности).

Методология исследования

Для оценки запаса устойчивости отвалов на склоне в данной работе использован метод конечных элементов (МКЭ), реализованный в программном комплексе GeoStudio slope/w 2D.

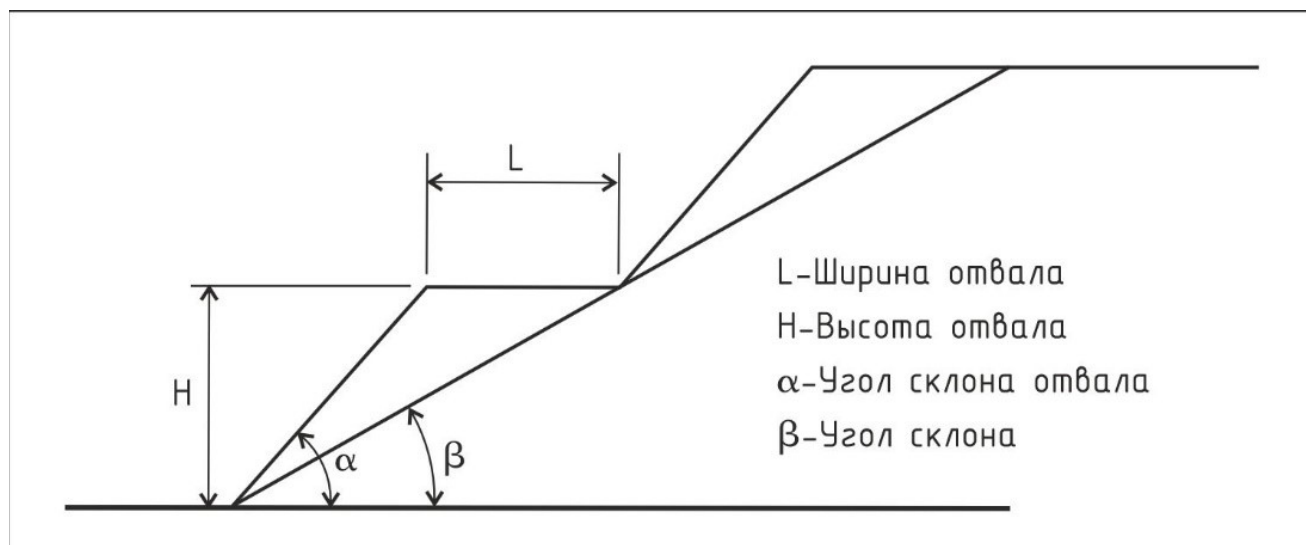
Выбор метода устойчивости отвала влияет на результаты анализа. Большинство методов устойчивости отвала включены в программное обеспечение GeoStudio slope/w для оценки устойчивости которое позволило использовать множественные критерии разрушения. Обычно доступны методы, Bishop, Janbu (упрощенный и исправленный), Spencer и Morgenstern-Price, причем последние два являются более продвинутыми. Количество срезов также определяется на этом этапе. Большее количество срезов приводит к более точным результатам, но увеличивает время, необходимое для критического анализа поиска.

Свойства грунта вводятся в анализ. Они включают удельный вес слоя грунта и его характеристики прочности на сдвиг. Обычно используется критерий Кулона-Мора, следовательно, требуются сцепление и трение материалов.

Определение геометрических параметров отвала. Практический опыт проектирования отвалов показал важность наличия надежной конструкции отвалов. Основными геометрическими параметрами, которые следует учитывать при проектировании, являются высота, общий угол наклона и ширина площадки между ярусами. Как показано на рисунке 1. существует корреляция между геометрическими параметрами (высота, ширина и угол наклона отвала) и устойчивостью отвала. Устойчивость отвала уменьшается с увеличением высоты или уменьшением ширины откоса отвала. Аналогично занимаемая площадь отвала должна быть минимизирована. [1]

Интерпретация результатов в GeoStudio Slope/W для анализа коэффициентов безопасности и определения положения критической поверхности скольжения, расчеты ввелись по методу Моргенштейн-Прайса. Визуализация данных, такая как графики и анимации, помогают понять конструкцию отвала. Важно учитывать влияние различных параметров на факторы безопасности, физико-механические свойства, а также в данной интерпретации рассмотрены влияния геометрических параметров на устойчивость отвала вскрышных пород на склоне.

• Рисунок 1. Схема многоярусного отвала на склоне.



Результаты расчетов

Физико-механические свойства грунтов, использованные в расчетах. Значения параметров выбраны на основе инженерно-геологических изысканий типичных для условий нагорных месторождений. Параметры приведены в таблице 1:

• Таблица 1. Физико-механические свойства грунтов основания и вскрышных пород

Параметр	Единица измерения	Основание	Вскрышная порода
Удельный вес, γ	кН/м ³	22,41	13,14
Угол внутреннего трения, ϕ	градусы	19	14,93
Сцепление, c	МПа	0,1	0,01

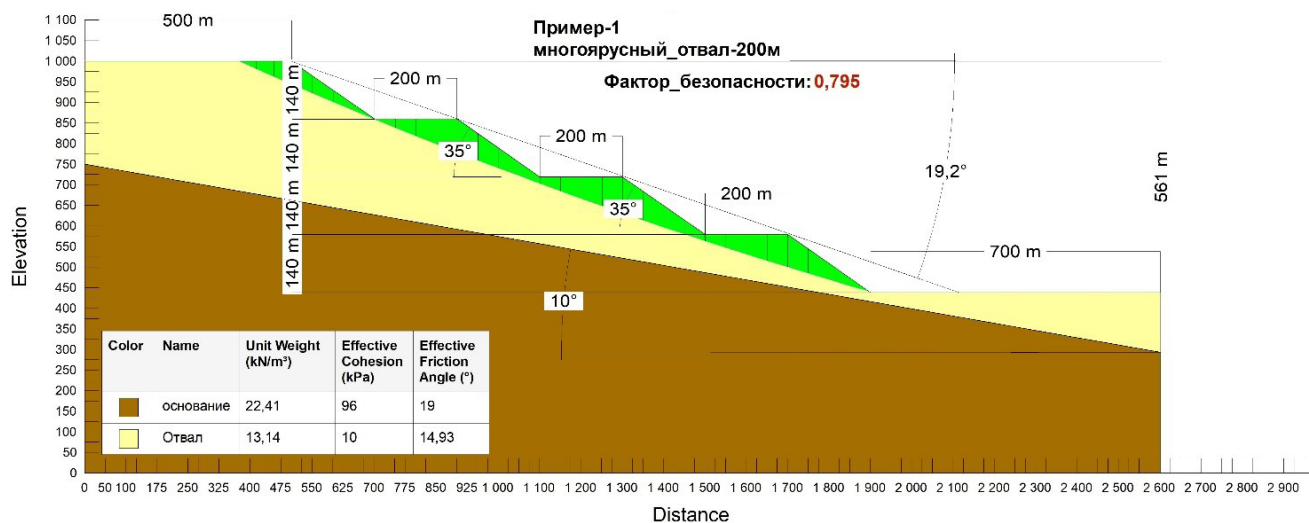
В данных расчетах рассмотрены примеры, где имеет место разница в геометрических параметрах. В первом случае расстояние площадки отвала между ярусами составляет 200м, в последнем 300м., промежуточные значения взяты с шагом в 25 метров при одинаковых физико-механических свойствах отвала вскрышных пород (рисунки 2).

По результатам расчетов, где расстоянием площадки между ярусами составляет 200м с генеральным углом отвала 19 градусов построено 4 яруса и имеет значение фактора безопасности равному 0,79.

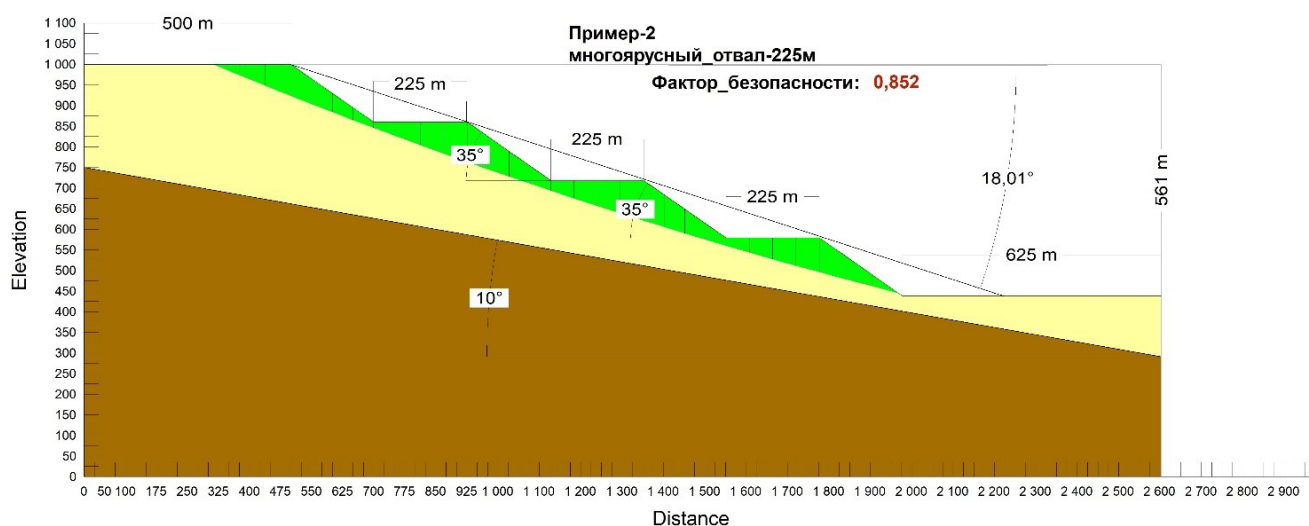
Аналогично при ширине площадки между ярусами 300м с генеральным углом отвала 16 градусов построено 4 яруса и имеет фактор безопасности равному 1,23.

Влияние ширины площадки отвала. На рисунке 3 приведена диаграмма зависимости фактора безопасности от ширины площадки между ярусами. Характер зависимости носит монотонно возрастающий характер, что подтверждает необходимость оптимизации геометрии отвалов с точки зрения обеспечения безопасности.

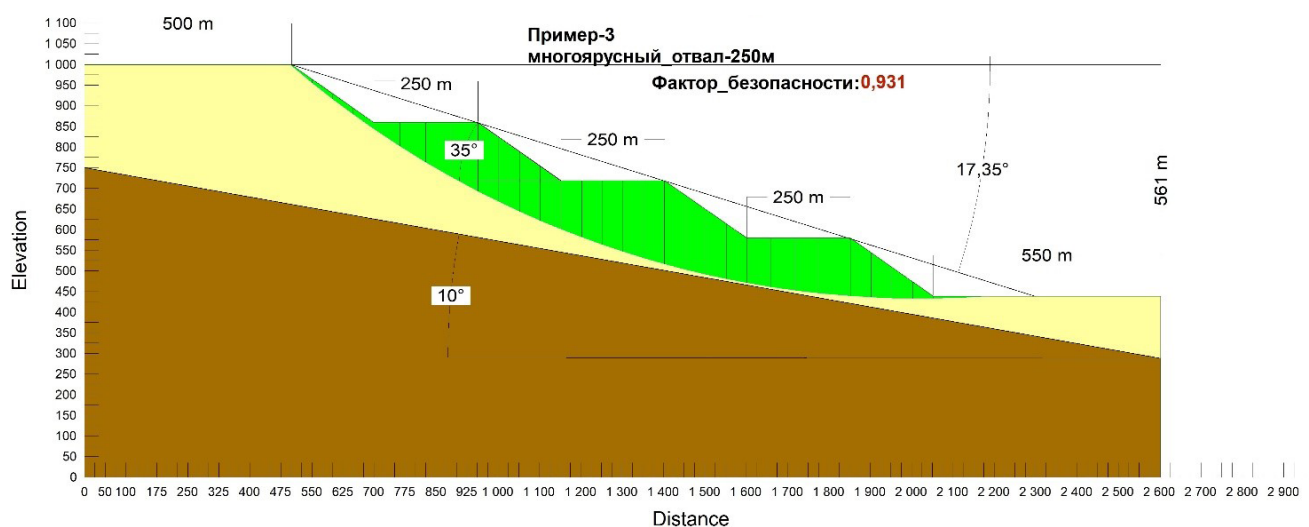
- Рисунок 2. Показаны примеры изменения фактора безопасности в зависимости от ширины площадки между ярусами с шагом 25 м



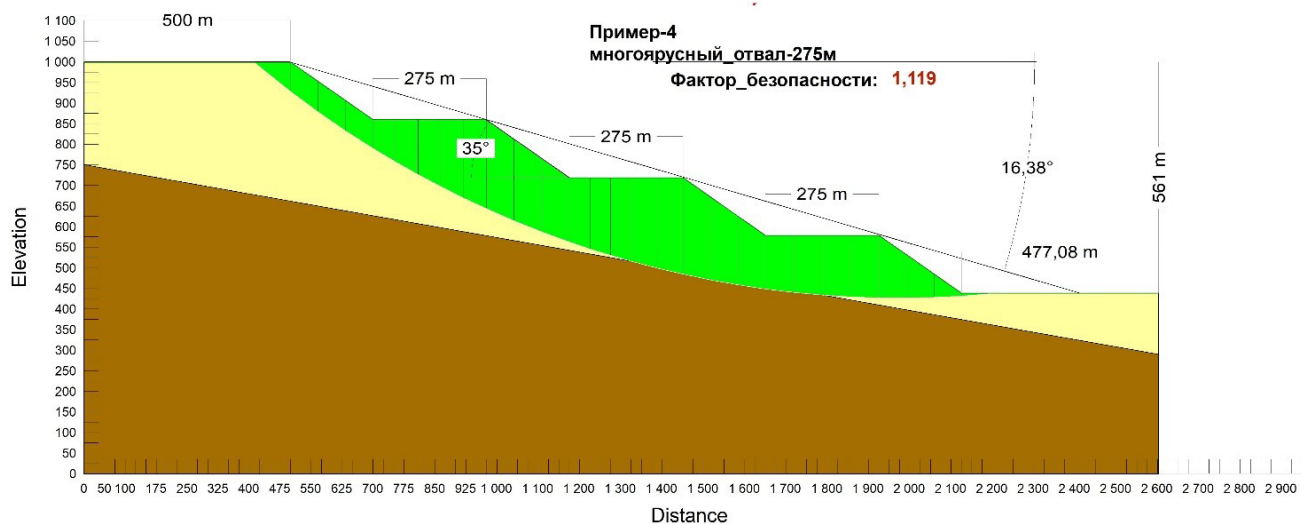
ширина площадки между ярусами равна 200 м



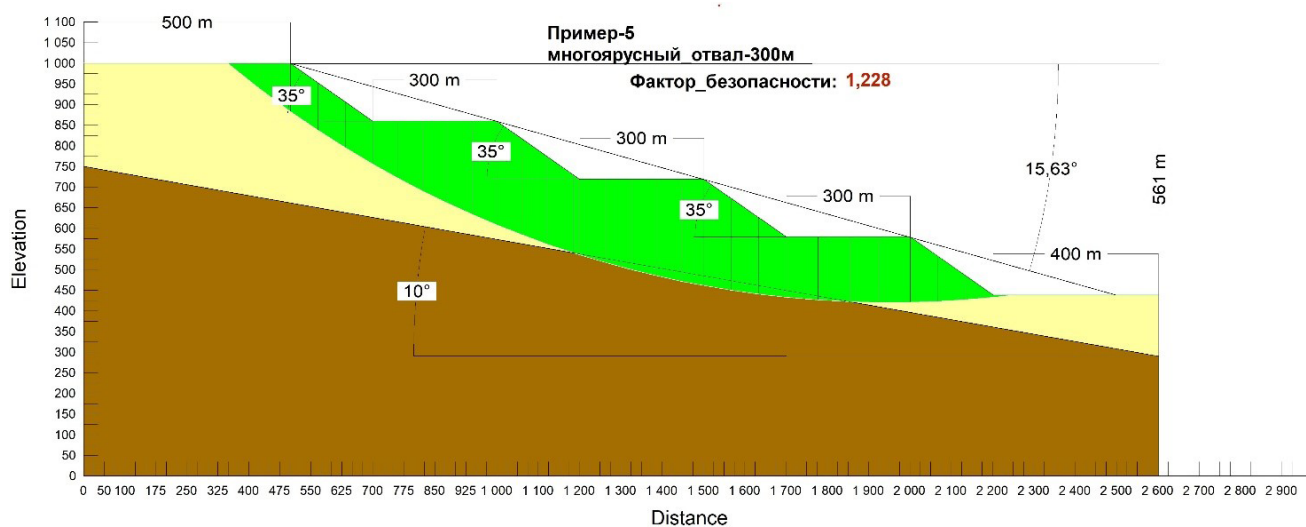
ширина площадки между ярусами равна 225 м



ширина площадки между ярусами равна 250 м

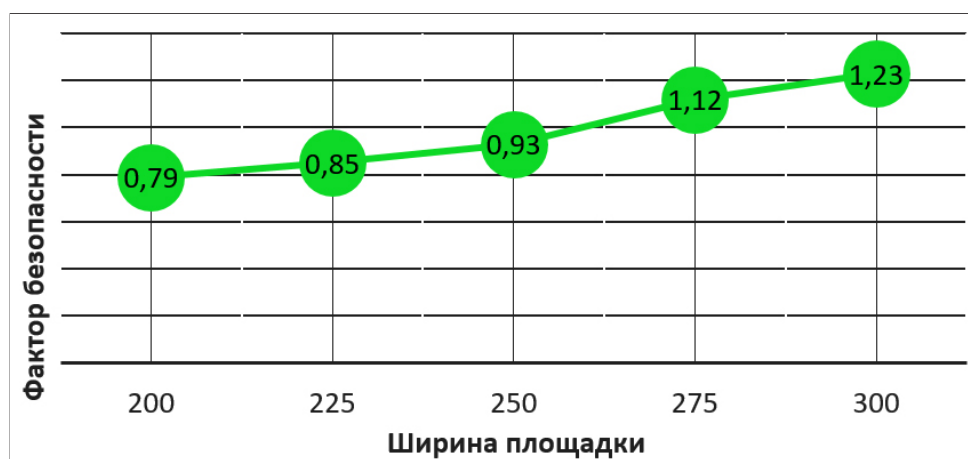


ширины площадки между ярусами равна 275м



ширина площадки между ярусами равна 300 м

• Рисунок 3. Зависимость фактора безопасности от ширины площадки между ярусами отвалов вскрышных пород.



Изменение генерального угла и фактора безопасности отвала в зависимости от ширины площадки между ярусами показано в таблице 2.

• Таблица 2. Изменение генерального угла и фактора безопасности

Ширина площадки между ярусами	Количество ярусов (шт)	Угол наклона основания, градус	Генеральный угол наклона отвала, градус	Фактор безопасности
200	4	10	19,2	0,80
225			18,01	0,85
250			17,35	0,93
275			16,38	1,12
300			15,63	1,23

Из таблицы можно сделать вывод, что с увеличением ширины площадки между ярусами уменьшается генеральный угол отвала, следовательно, увеличивается фактор безопасности отвалов вскрышных пород на склонах.

Анализ результатов показывает, что увеличение ширины площадки между ярусами на 100 м способствует росту коэффициента устойчивости – на 35%. Это объясняется снижением градиента напряжений, перераспределением сдвиговых усилий и увеличением площади опорной поверхности.

Выводы

1. Анализ проведённого численного моделирование показал, что геометрические параметры (в первую очередь ширина площадки между ярусами) существенно влияют на устойчивость многоярусных отвалов вскрышных пород, размещённых на склонах.
2. Увеличение ширины площадки между ярусами с 200 до 300 м привело к увеличению коэффициента безопасности с 0,80 до 1,23, что соответствует повышению безопасности на 35%.
3. Расширение площадок между ярусами может быть использовано как эффективная инженерная мера повышения устойчивости отвалов без существенного увеличения объёма работ.
4. Полученные зависимости имеют практическую значимость при проектировании отвалообразования в условиях нагорных месторождений, особенно в регионах с высокой сейсмической и климатической нестабильностью.
5. Метод конечных элементов в сочетании с методом Моргенштейна-Прайса в программной среде GeoStudio Slope/W показал высокую эффективность для решения задач устойчивости отвалов и может быть рекомендован для инженерной практики.

Список использованных источников

1. Kolapo P. An overview of slope failure in mining operations / P.Kolapo, G.O.Oniyide, K.O. Said // Mining. – 2022. – Т. 2. – С. 350–384. – DOI: 10.3390/mining2020019.
2. Geostudio-Stability Modeling. Copyright © 2022 Seequent Limited, The Bentley Subsurface Company. – Режим доступа: <https://www.geoslope.com/products/geostudio>

3. Агафонов А.А. Обоснование устойчивых параметров отвалов на основе геомеханической модели проектируемых объектов / А.А. Агафонов, Т.В. Поршнева // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 3. – С. 5–20. – Режим доступа: <https://giab-online.ru/files/Data/2020/3/5-20.pdf>
4. Гальперин А.М., Кутепов Ю.И., Еремин Г.М. Методы определения параметров отвалов и технологии отвалообразования на склонах. – Режим доступа: <https://www.gornaya-kniga.ru/periodic/1629>
5. Раянова А.Р., Мустафин Р.Ф. Теоретическая оценка оползневых процессов и методы расчёта устойчивости склонов // КиберЛенинка. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/teoreticheskaya-otsenka-opolznevyyh-protsessov-i-metody-raschetov-ustoychivosti-sklonov>
6. Джакупбеков, Б.Т. Численное моделирование устойчивости отвалов вскрышных пород при освоении нагорных месторождений [Текст] / Б.Т. Джакупбеков, З.А. Асилова, О.В. Никольская // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. Новосибирск, 2023. – Т. 10. № 1. – С. 30–36.
7. Асилова, З.А. Отличительные признаки устойчивости отвалов обеспечивающие безопасное складирование вскрышных пород на склоне / З.А. Асилова, Б.Т. Джакупбеков // Известия ВУЗов Кыргызстана. Бишкек, 2023. – № 3. – С. 12–15.
8. Popov I.I., Okatov R.P., Nizametdinov F.K. Mechanics of rock masses and stability of open pit slopes. – Almaty: Science, 1986. – 256 p.
9. Wang G., Sassa K., Fukuoka H. Dynamic modeling of slope failure processes under rainfall conditions // Engineering Geology. – 2003. – Vol. 69, № 1–2. – P. 45–68. – DOI: 10.1016/S0013-7952(02)00264-6
10. Dai F.C., Lee C.F., Ngai Y.Y. Landslide risk assessment and management: an overview // Engineering Geology. – 2002. – Vol. 64, № 1. – P. 65–87. – DOI: 10.1016/S0013-7952(01)00093-X
11. Read J., Stacey P. Guidelines for Open Pit Slope Design. – CSIRO Publishing, 2009. – Режим доступа: <https://www.publish.csiro.au/book/5854>
12. Terzaghi K., Peck R.B., Mesri G. Soil Mechanics in Engineering Practice. – 3rd ed. – John Wiley & Sons, 1996. – Режим доступа: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470172766>

Received / Получено 02.08.2025

Revised / Пересмотрено 22.09.2025

Accepted / Принято 20.10.2025