

УДК 622.271

© Д.В. Винивитин, М.В. Назаренко, С.А. Хоменко

**ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАРЬЕРОВ И ОТВАЛОВ
В K-MINE – КАК СОСТАВНОЙ ЭЛЕМЕНТ МИНИМИЗАЦИИ
ПЛОЩАДЕЙ НАРУШЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ
ПРИ ВЕДЕНИИ ГОРНЫХ РАБОТ**

© D. Vinivitin, M. Nazarenko, S. Khomenko

**GEOMECHANICAL MODELING OF MINES AND DUMPS USING K-MINE
TO MINIMIZE THE DISTURBED LANDS AREAS
IN MINING OPERATIONS**

Цель исследования - изложение основных положений использования автоматизированной системы геомеханического моделирования карьеров и отвалов на базе программного продукта «K-MINE: Расчет устойчивости» в условиях ЧАО «Полтавский ГОК».

Методика. Наведены примеры практического использования данной автоматизированной системы при решении прикладных задач по определению фактической устойчивости бортов и уступов карьера и отвалов, а также определения оптимальных по безопасности и экологическому воздействию на окружающую среду параметров их конструкции. Методика расчета устойчивости ярусов и бортов отвалов заключается в решении задачи по определению коэффициента запаса устойчивости бортов с предельно возможными параметрами.

Результаты. На основании рассчитанных значений коэффициента запаса устойчивости (КЗУ) на базе созданных геологических разрезов профильных линий выполняется обобщение результатов и сведение всей информации под единую информационную основу. Исследование обобщенной информации дает возможность спрогнозировать и создать карту устойчивого состояния уступов и бортов анализируемого участка борта карьера по состоянию на момент выполнения исследований.

Научная новизна. Решение задачи обеспечивается путем расчета призмы возможного обрушения и положения поверхности скольжения в отвальном массиве горных пород при заданных максимально достижимых параметрах отвала. После построения призмы возможного обрушения осуществляют расчет ее устойчивости методом векторного сложения сил. Полученный результат расчета позволяет судить о соответствии выбранного профиля борта отвала с результирующим углом наклона – нормативному значению коэффициента запаса устойчивости для принятия рационального технологического решения по обеспечению устойчивости предельного угла и высоты отсыпаемого откоса.

Практическое значение. Результаты расчетов в условиях горного производства ЧАО «Полтавский ГОК», сделанные в K-MINE, позволяют подготовить обоснование о возможности дополнительном наращивания высоты отвалов на 5-7 ярусов (100-140 м) без изменения размера границ отвалов в плане, что позволит дополнительно разместить в них более 500 млн. м³ вскрышных пород.

Ключевые слова: геомеханическая модель, карьеры, отвалы, расчёт устойчивости, горные работы

Вступление. Полезные ископаемые – важная часть природного богатства недр. В Украине разработка большинства видов минерального сырья осуществ-

ляется открытым способом.

Закономерное увеличение глубины и объемов открытых горных работ и, как правило, усложнение геологических, гидрогеологических и инженерно-геологических условий разработки определяют качественно новый подход к обеспечению устойчивости бортов глубоких карьеров и высоких отвалов.

Знание закономерностей развития геомеханических процессов в массивах горных пород позволяет регламентировать мероприятия по направленному изменению их состояния и, соответственно, обеспечить экономическую эффективность горных работ, а также промышленную и экологическую безопасность.

По мере роста глубины горных работ инженерно-геологическая ситуация усложняется, а процессы изменения этой ситуации становятся более быстрыми и сопровождаются качественно новыми проявлениями, нарушающими безопасность ведения горных работ и состояния окружающей среды. В связи с этим, оценка инженерно-геологической ситуации, прогнозирование и разработка способов управления ее развитием предусматривают решение следующих основных задач: изучение физико-механических свойств и структурно-механических особенностей массивов пород; исследование и прогнозирование механических процессов в массивах при производстве горных работ; управление состоянием массивов, с том числе разработку способов контроля этого состояния с учетом вида и характера ведения горных работ.

Интенсивность геомеханических процессов неразрывно связана с технологией открытых горных работ, которой определяется динамика формирования бортов и отвалов. Закономерности развития геомеханических процессов представляют интерес также с позиции последующего использования нарушенными горными работами территорий: оценки возможных деформаций бортов карьеров в конечных контурах, территориальное размещение и характеристики отвалов, оценка их несущей способности после их рекультивации [1, 2].

В настоящее время, в эру развития компьютерных технологий в горном деле, большинство задач геомеханики могут быть формализованы и положены в основу программных модулей геоинформационных и горно-геологических систем.

В связи с этим, цель данной статьи – показать эффективность вычислительных алгоритмов на основе программного комплекса «K-MINE: Расчет устойчивости» для оценки существующего геомеханического состояния уступов и бортов, а также прогнозных параметров карьера и отвалов ЧАО «Полтавский ГОК». Решения, получаемые с применением данного комплекса, направлено на минимизацию площадей земель, нарушенных горными работами, и позволит в будущем снизить экологическое воздействие на окружающую среду.

Состояние проблемы и выходные положения работы. Карьер ЧАО «Полтавский ГОК» обрабатывает запасы Горишне-Плавнинского и Лавриковского месторождений железистых кварцитов вот уже более 50 лет. По состоя-

нию на 01.01.2018 г. длина карьера по поверхности составляет 6,0 км, ширина в южной части – 2 км. Глубина карьера – 390 м (горизонт минус 320 м).

При разработке залежи для выемки руды формируются зоны углубления, а для выемки вскрышных пород – крутые слои (напластование) с углами наклона, близкими к углам погашения борта карьера. Крутые слои разрабатываются путем опускания рабочих панелей длиной 600-1200 м при железнодорожном транспорте и 300-400 м – при автомобильном, вдоль простирания залежи. При опускании панели до отметки дна карьера разрезные траншеи расширяются, что обеспечивает нарезку новых и дальнейшее развитие существующих разрезных траншей.

При ведении горных работ в зоне предельных или временно нерабочих контуров для снижения влияния технологических взрывов на деформации массива используется приконтурная (лента) зона. Параметры приконтурной зоны устанавливаются по результатам маркшейдерских инструментальных наблюдений, как зоны остаточных деформаций [3]. Для условий карьера Полтавского ГОКа ширина этой зоны составляет 30 м. Для снижения интенсивности сейсмического воздействия взрывные работы производятся с применением многорядного короткозамедленного взрывания, а коммутацию взрывной сети по секционной схеме.

На состояние устойчивости обнажений выработанного пространства карьера влияют горно-геологические и структурно-геологические условия массива горных пород.

В зонах разрывных нарушений, с блочной структурой массива при проведении взрывных работ, образуются многочисленные негабариты, в сланцах, где направление тектонических трещин совпадает со слоистостью пород, увеличивается количество трещин на 1 пог. м на несколько порядков. Такая интенсивная трещиноватость способствует сдвигам крупных блоков пород в обнажениях и обрушению, что приводит к нарушению предохранительных и транспортных берм. Для оценки горно-геологических и структурно-геологических особенностей горного массива в карьере ведутся регулярные натурные наблюдения. В результате данных работ образуется значительные объемы информации.

На точность геомеханических расчетов также оказывают влияние гидро-геологические и инженерно-геологические условия, которые также являются сложными. Это обусловлено наличием водонасыщенной перекрывающей толщи осадочных пород и подземных вод кристаллических пород докембрия.

Обработка инженерно-геологической исходной информации и графоаналитические расчёты устойчивости откосов бортов карьера выполняются с использованием программного продукта K-MINE. Его использование позволило разработать автоматизированную систему (АС) расчётного геомеханического обоснования устойчивости откосов уступов и бортов в соответствии с нормативными и методическими требованиями безопасного ведения горных работ по условиям устойчивости откосов [4-6].

Для проведения необходимых геомеханических расчетов используется трехмерная модель горного массива (геологической среды), включающая модель месторождения и модель выработанного пространства карьера и отвалов (рис. 1).

Методика расчета устойчивости ярусов и бортов отвалов заключается в решении задачи по определению коэффициента запаса устойчивости бортов с предельно возможными параметрами.

Решение задачи обеспечивается путем расчета призмы возможного обрушения и положения поверхности скольжения в отвальном массиве горных пород при заданных максимально достижимых параметрах отвала (рис. 2).

После построения призмы возможного обрушения осуществляют расчет ее устойчивости методом векторного сложения сил (рис. 3). Полученный результат расчета позволяет судить о соответствии выбранного профиля борта отвала с результирующим углом наклона – нормативному значению коэффициента запаса устойчивости для принятия рационального технологического решения по обеспечению устойчивости предельного угла и высоты отсыпаемого откоса.

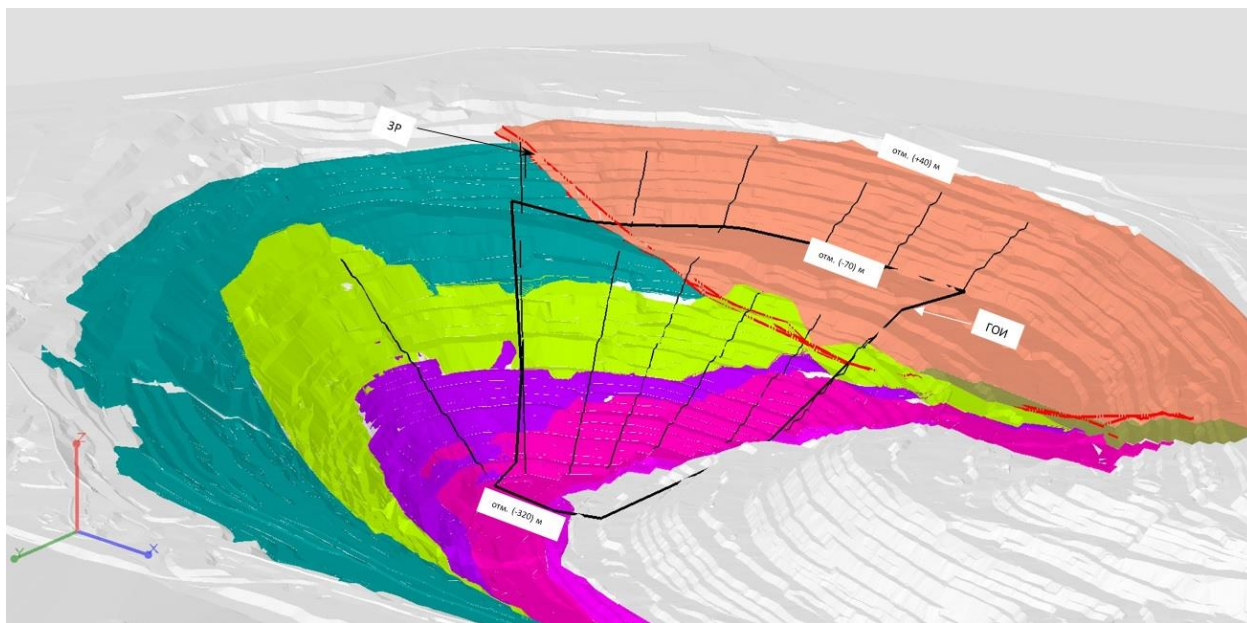


Рис. 1. Совмещенная трехмерная модель Горишне-Плавнинского и Лавриковского месторождения и выработанного пространства с прилежащими отвалами и территориями

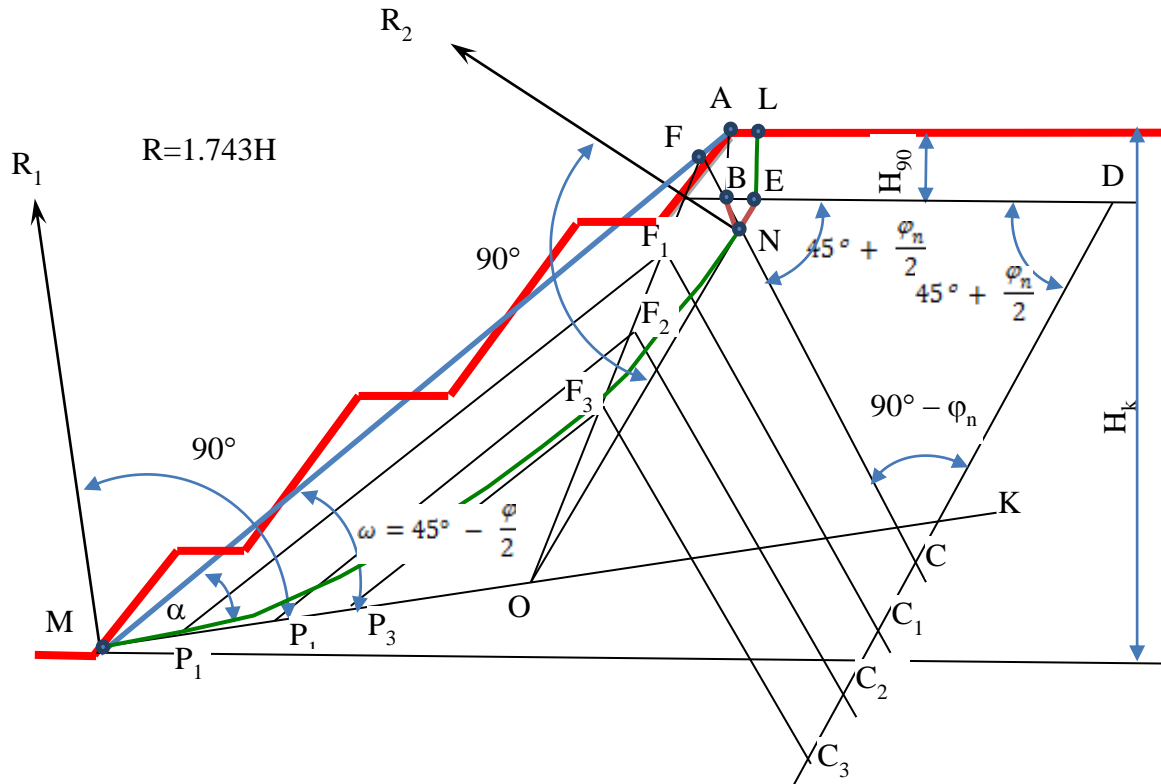


Рис. 2. Схема построения ширины и поверхности скольжения призмы возможного обрушения для определения степени устойчивости уступов и участков временно-нерабочих бортов карьера в К-MINE

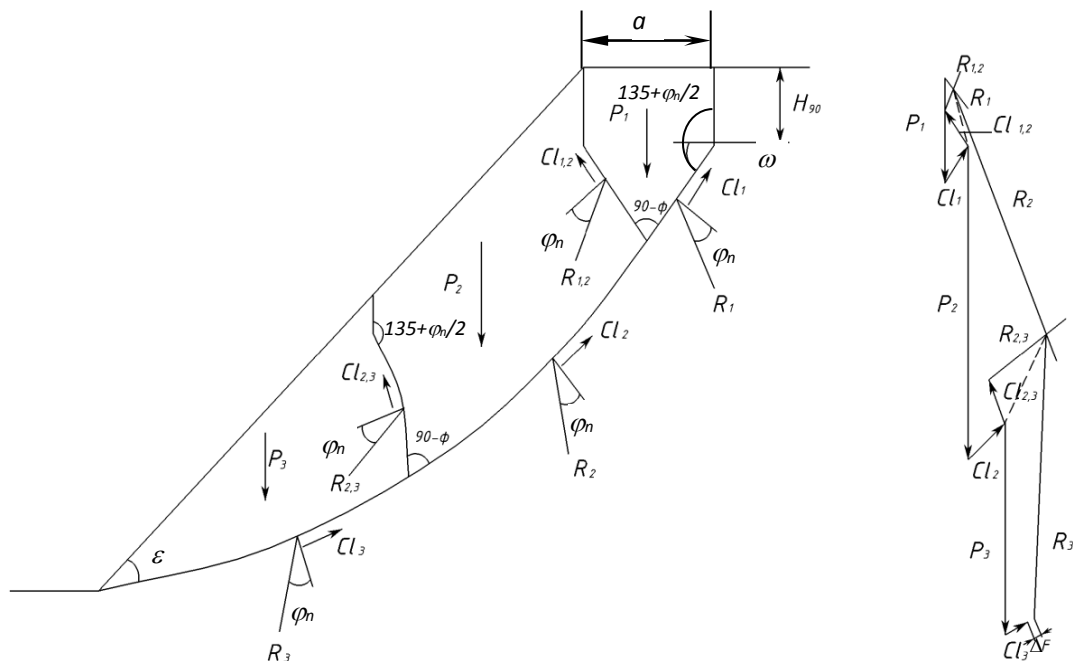


Рис. 3. Расчетная схема к определению устойчивого состояния уступов и участков бортов карьера по методу векторного сложения сил в многоугольниках в К-MINE

Использование для расчётов устойчивости откосов модуля программного комплекса «K-MINE» позволяет всегда получать условие нахождения наиболее напряжённой поверхности с заданной точностью их определения для «истинного» значения величины коэффициента запаса, которая даёт возможность судить о её соответствии нормативному требованию.

Так как горный массив месторождения состоит из скальных пород кристаллического фундамента, перекрытых толщей рыхлых пород осадочного чехла, то для оценки устойчивости бортов и ярусов отвалов, расположенных на западном и восточном бортах карьера, используется схема построения криволинейной поверхности скольжения призмы оползания отвала на слабом основании (рис. 4).

Работа программного комплекса «K-MINE: Расчет устойчивости» начинается с выполнения подготовительных операций. Формируется единая геолого-маркшейдерская модель исследуемого объекта на основании актуальных цифровых моделей. Подготавливается расчетная основа: выбираются основные направления исследования, строятся совмещенные геолого-маркшейдерские разрезы по направлениям. Расчет устойчивости выполняется для каждого разреза (рис. 5).

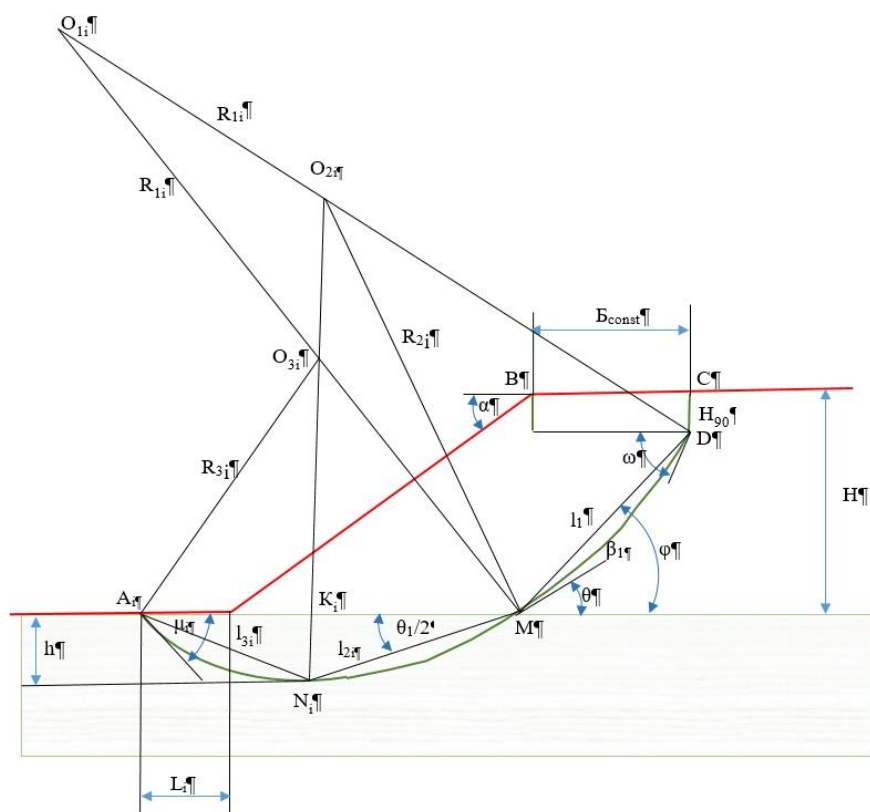


Рис. 4. Схема построения криволинейной поверхности скольжения призмы оползания отвала на слабом основании

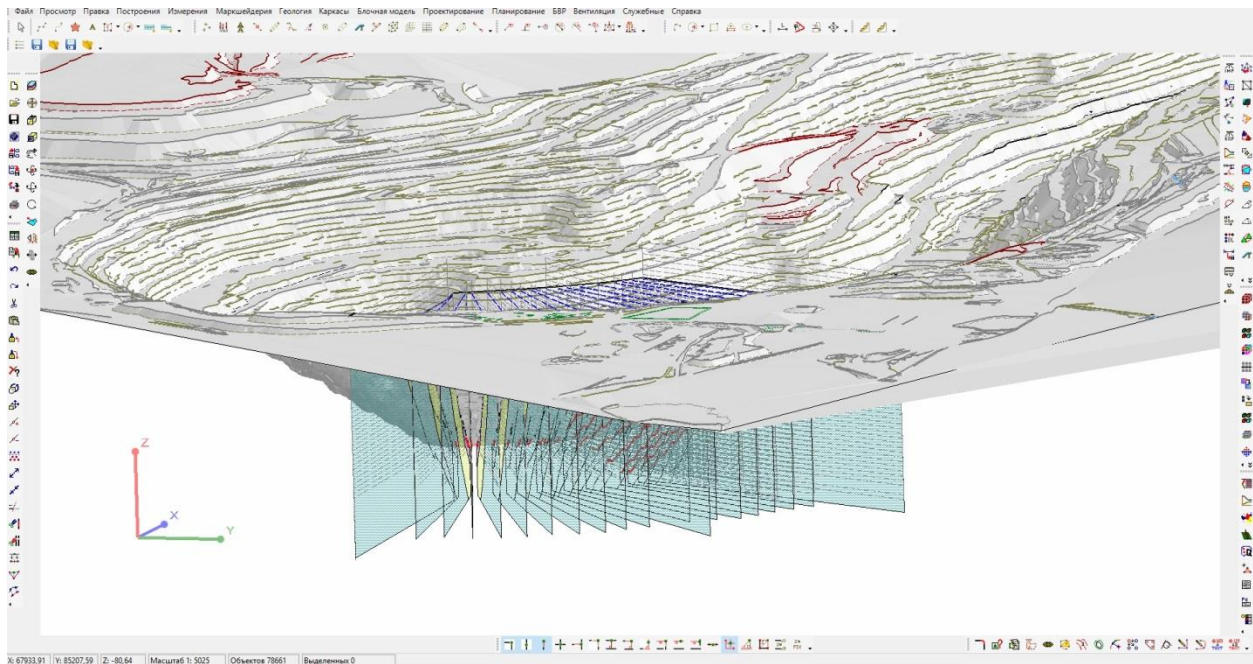


Рис. 5. Подготовка расчетной основы для оценки устойчивости борта карьера

На основании настроенных параметров выполняется решение прямой задачи путем расчета и построения поверхностей скольжения, а также оценивается значение коэффициента запаса устойчивости для заданных участков бортов и уступов. Задача оценивает множество вариантов расчета (рис. 2, 3, 4).

Программа автоматически на основании первичной маркшейдерской и геологической информации выполняется оценку фактических углов откоса уступов и участков бортов, отстраивает поверхности скольжения и на их основе производит расчет фактического коэффициента запаса устойчивости (при решении «прямой задачи»). Расчетная информация выносится в таблицу и на графическую основу. Все промежуточные геометрические расчеты выполняются аналитически.

Кроме решения «прямой», совместно решается и обратная задача. То есть на основании нормативного значения коэффициента запаса устойчивости $\eta=1.25$ рассчитываются предельно-допустимый угла откоса борта (участка борта, уступа), обеспечивающего запас требуемой нормативной устойчивости (рис. 6). При этом при определении величин предельных углов, учитываются мероприятия по постановке борта или его участка с заданным углом. То есть, учитывается характер работ и время стояния борта: рабочий борт, временно-нерабочий или постоянный борт.

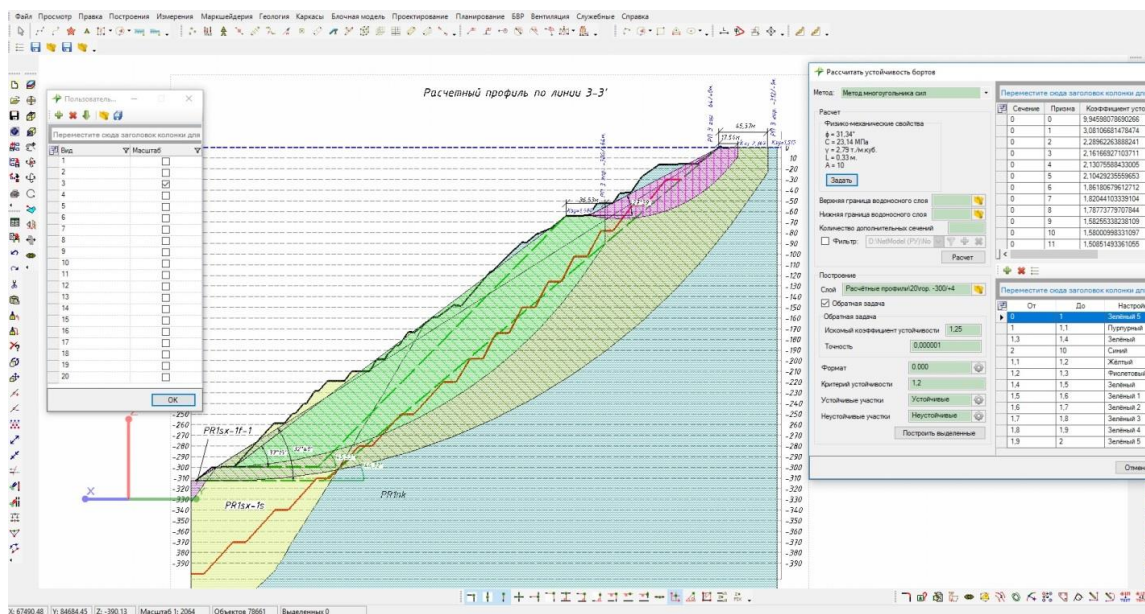


Рис. 6. Расчетный разрез с вынесением фигур поверхностей скольжения по участкам, расчетом и оценкой фактического коэффициента запаса устойчивости для каждой поверхности скольжения и параметрами величин предельно допустимого угла для данных горно-геологических условий

Полученные практические результаты. На основании рассчитанных значений коэффициента запаса устойчивости КЗУ на базе созданных геологических разрезов профильных линий выполняется обобщение результатов и сведение всей информации под единую информационную основу. Исследование обобщенной информации дает возможность спрогнозировать и создать карту устойчивого состояния уступов и бортов анализируемого участка борта карьера по состоянию на момент выполнения исследований. Обобщенная карта распределения величин коэффициентов запаса устойчивости откосов приведена на рис. 7, карта предельно допустимых углов наклона групп уступов, соответственно на рис. 8.

Аналогичным образом выполняется оценка устойчивого состояния отвалов. На рис. 9 приведен расчетный разрез по профилю для оценки устойчивости борта отвала, на рис. 10 – обобщенная карта распределения величин коэффициентов запаса устойчивости откосов отвала «Западный».

Полученные расчетные данные используются для оценки возможности наращивания высоты отвалов без необходимости изменения его профиля, а также определения оптимальных, безопасных расстояний от границы карьера по верху до контура отвалов по низу, обеспечивающих их безопасную эксплуатацию.

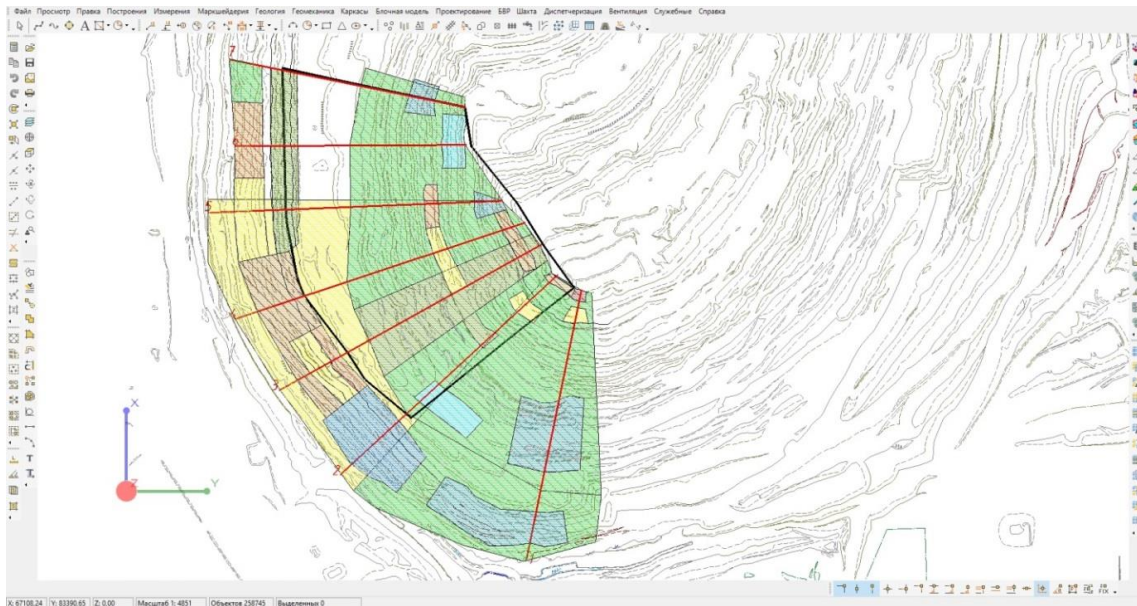














Рис. 7. Карта распределения фактических коэффициентов запаса устойчивости откосов юго-западного борта карьера ЧАО «ПГОК»

-  — Участок борта с коэффициентом запаса $\eta = 1,00 \dots 1,10$
-  — Участок борта с коэффициентом запаса $\eta = 1,10 \dots 1,20$
-  — Участок борта с коэффициентом запаса $\eta = 1,20 \dots 1,30$
-  — Участок борта с коэффициентом запаса $\eta = 1,30 \dots 1,40$
-  — Участок борта с коэффициентом запаса $\eta = 1,40 \dots 1,50$
-  — Участок борта с коэффициентом запаса $\eta = 1,50 \dots 1,60$
-  — Участок борта с коэффициентом запаса $\eta = 1,60 \dots 1,70$
-  — Участок борта с коэффициентом запаса $\eta = 1,70 \dots 1,80$
-  — Участок борта с коэффициентом запаса $\eta = 1,80 \dots 1,90$
-  — Участок борта с коэффициентом запаса $\eta = 1,90 \dots 2,00$
-  — Участок борта с коэффициентом запаса $\eta = 2,00 \dots 2,50$
-  — Участок борта с коэффициентом запаса $\eta > 2,50$

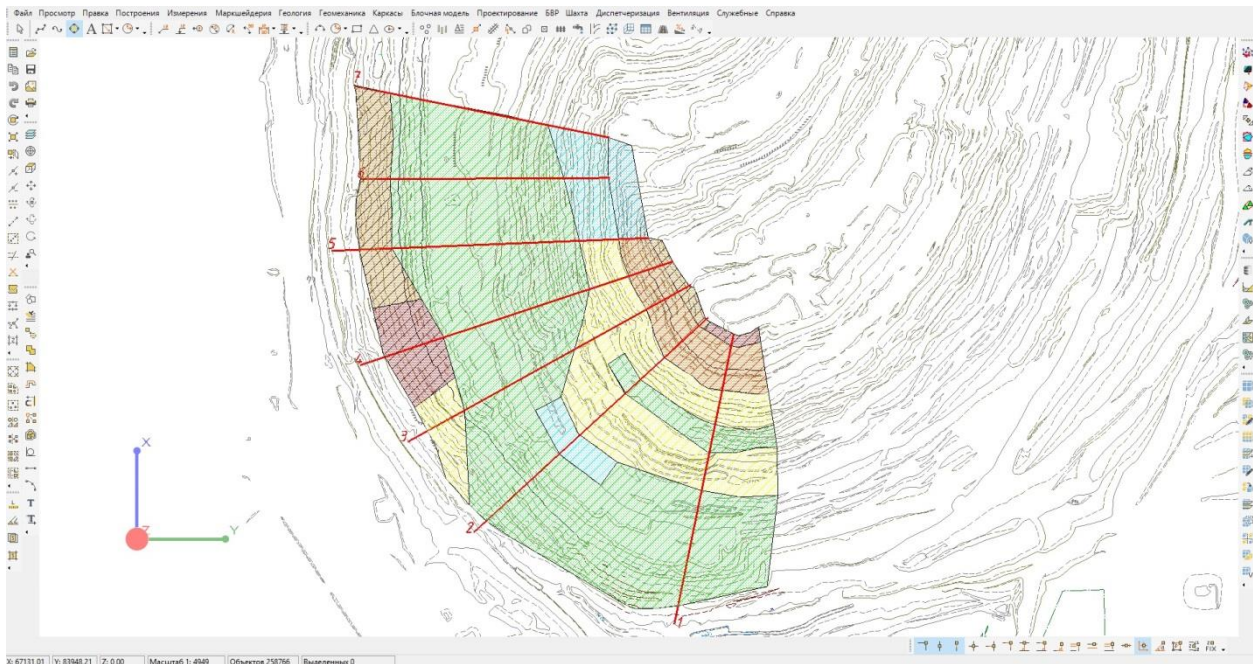











Рис. 8. Карта предельно допустимых углов наклона групп уступов юго-западного борта карьера ЧАО «ПГОК»

- | | | |
|---|---|---|
|  | — | Участок борта с максимально допустимыми углами 35 ... 37° |
|  | — | Участок борта с максимально допустимыми углами 38 ... 40° |
|  | — | Участок борта с максимально допустимыми углами 41 ... 43° |
|  | — | Участок борта с максимально допустимыми углами 44 ... 46° |
|  | — | Участок борта с максимально допустимыми углами 47 ... 50° |
|  | — | Участок борта с максимально допустимыми углами 51 ... 53° |
|  | — | Участок борта с максимально допустимыми углами 54 ... 56° |
|  | — | Участок борта с максимально допустимыми углами 57 ... 59° |
|  | — | Участок борта с максимально допустимыми углами 60 ... 63° |

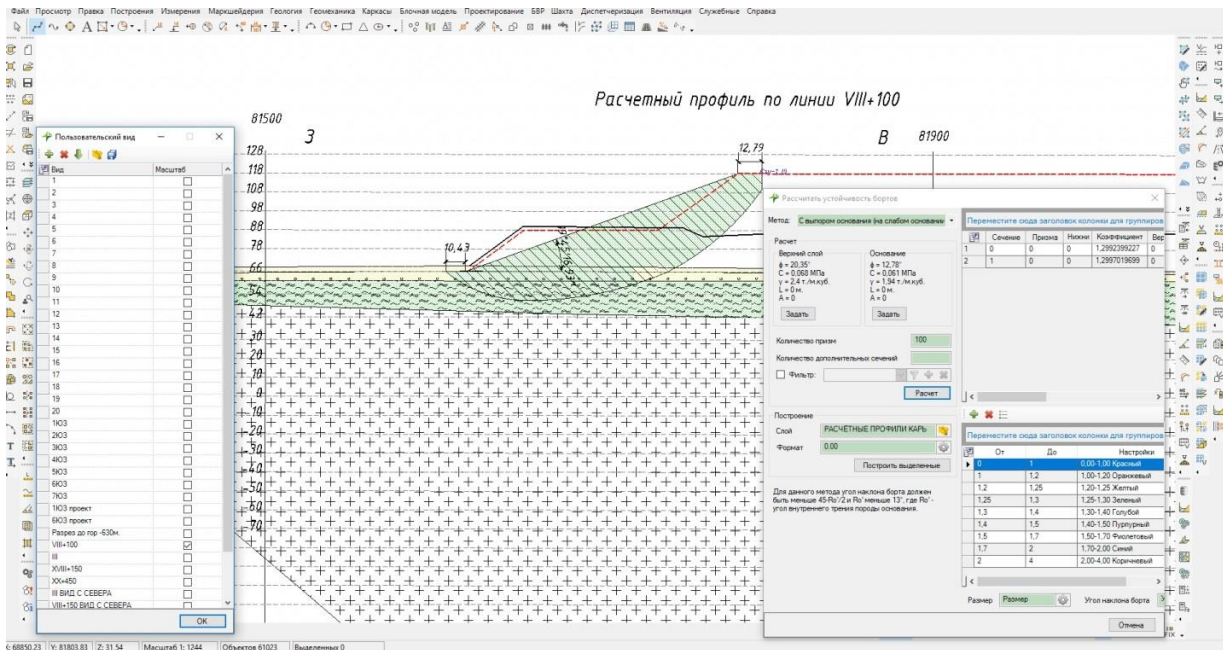


Рис. 9. Расчетный разрез по профилю VIII+100 с вынесением поверхности скольжения, расчетом и оценкой коэффициента запаса устойчивости, а также с шириной призмы возможного оползания и выпирания

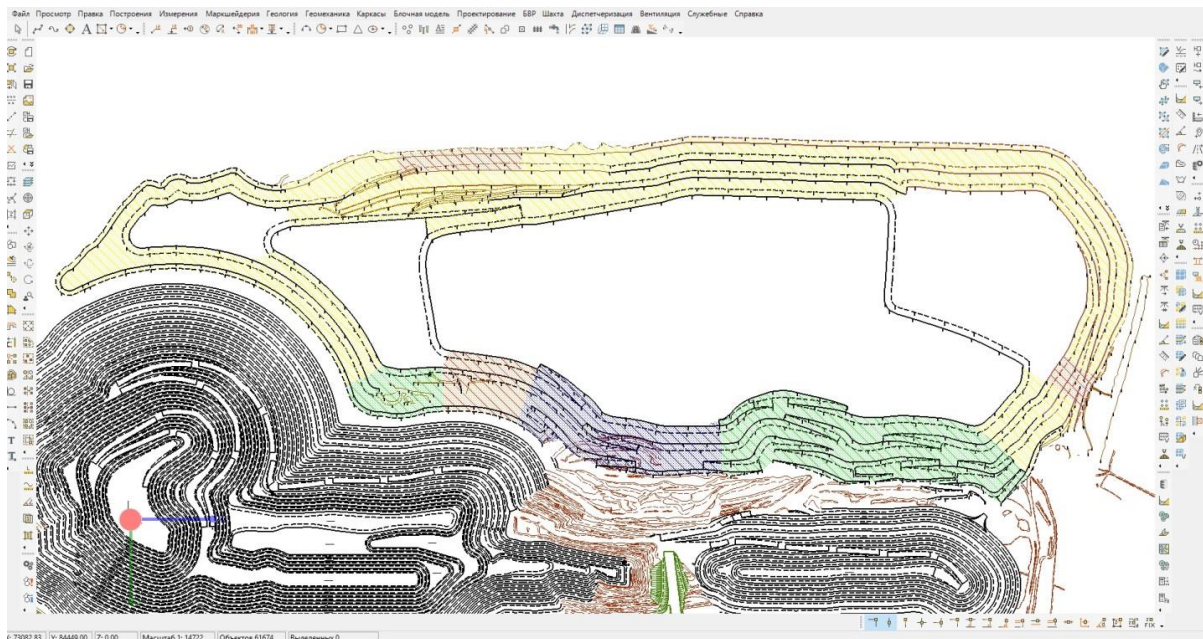





Рис. 10 – карта распределения коэффициента запаса устойчивости откосов в проектном положении – отвал «Западный»

-  – Участок борта с максимально допустимым углом 15°
-  – Участок борта с максимально допустимым углом 12°
-  – Участок борта с максимально допустимым углом 10°

Так, результаты расчетов в условиях горного производства ЧАО «Полтавский ГОК», сделанные в K-MINE, позволяют подготовить обоснование о возможности дополнительном наращивания высоты отвалов на 5-7 ярусов (100-140 м) без изменения размера границ отвалов в плане, что позволит дополнительно разместить в них более 500 млн. м³ вскрышных пород.

Полученные расчетные данные благоприятно влияют на экологическую ситуацию в районе, позволяя минимизировать площади нарушенных земель под размещение отвалов при дальнейшем развитии горных работ и отработке запасов.

Выводы. Внедрение указанной автоматизированной системы геомеханических расчетов позволило сократить сроки выполнения анализа накопленной информационной базы данных за 30 лет инженерно-геологических, гидрогеологических и геомеханических условий разработки Горишне-Плавнинского и Лавриковского месторождения и условий устойчивости откосов в карьере, а также пополнить «базу» новыми исходными данными для оценки текущего состояния прибортового массива горных пород в ходе подвигания горных работ к конечному (проектному) контуру карьера, контролировать отклонения фактического состояния устойчивости откосов от нормативной величины коэффициента запаса [2].

В случае установления снижения нормативной величины коэффициентов запаса устойчивости откосов оперативно принимать меры по предотвращению возможного развития разрушающих деформаций прибортового массива горных пород [4-6].

Расчетные величины, полученные с использованием K-MINE, принимаются в качестве основания для новых проектных решений при отработке карьера и формировании отвалов.

Перечень ссылок

1. Галустьян, Э.Л. (1992). *Геомеханика открытых горных работ*. М.: Недра, 272 с.
2. Гальперин, А.М. (2003) *Геомеханика открытых горных работ: Учебник для вузов*. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 473 с.
3. Карташов, Ю.М., Матвеев, Б.В., Михеев, Г.В., Фадеев, А.Б. (1979) *Прочность и деформируемость горных пород*. – М.: Недра, 269 с.
4. *Правила охраны труда при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом*. НПАОП 0.00-1.24-40 – Харьков: Госгорпромнадзор Украины, 2010. –107 с.
5. *Норми технологічного проектування гірничодобувних підприємств із відкритим засобом розробки родовищ корисних копалин*. Частина 1. Гірничі роботи. Ліквідація гірничодобувних підприємств/СОУ-Н МПП 73.020-078-1:2007. – К.: МПП, 2007. – 100 с.
6. *Методичні вказівки з визначення оптимальних кутів нахилу бортів укосів уступів і відвалів залізородних та флюсових кар'єрів, Мінполітики та ІППЕ НАН України: Дніпропетровськ, 2009, 201 с.*

АНОТАЦІЯ

Мета дослідження - викладання основних положень використання автоматизованої системи геомеханічного моделювання кар'єрів і відвалів на базі програмного продукту «K-MINE: Розрахунок стійкості» в умовах ПрАТ «Полтавський ГЗК».

Методика. Наведені приклади практичного використання даної автоматизованої системи при вирішенні прикладних задач по визначенню фактичної стійкості бортів і уступів кар'єру і відвалів, а також визначення оптимальних з точки зору безпеки і екологічного впливу на навколишнє середовище параметрів їх конструкції. Методика розрахунку стійкості ярусів і бортів відвалів полягає у вирішенні завдання з визначення коефіцієнта запасу стійкості бортів з гранично можливими параметрами.

Результати. На підставі розрахованих значень коефіцієнта запасу стійкості (КЗС) на базі створених геологічних розрізів профільних ліній виконується узагальнення результатів та зведення всієї інформації під єдину інформаційну основу. Дослідження узагальненої інформації дає можливість спрогнозувати та створити карту стійкого стану уступів і бортів аналізованого ділянки борту кар'єру за станом на момент виконання досліджень.

Наукова новизна. Рішення завдання забезпечується шляхом розрахунку призми можливого обвалення і положення поверхні ковзання в відвальних масивах гірських порід при заданих максимально досяжних параметрах відвалу. Після побудови призми можливого обвалення здійснюють розрахунок її стійкості методом векторного додавання сил. Отриманий результат розрахунку дозволяє судити про відповідність обраного профілю борту відвалу з результируючим кутом нахилу - нормативному значенню коефіцієнта запасу стійкості для прийняття раціонального технологічного рішення по забезпеченню стійкості граничного кута і висоти відсипки відкосу.

Практичне значення. Результати розрахунків в умовах гірничого виробництва ПрАТ «Полтавський ГЗК», зроблені в K-MINE, дозволяють підготувати обґрунтування про можливість додаткового нарощування висоти відвалів на 5-7 ярусів (100-140 м) без зміни розміру границь відвалів в плані, що дозволить додатково розмістити в них більше 500 млн. м³ розкритих порід.

Ключові слова: геомеханическая модель, кар'єри, відвали, розрахунок стійкості, гірничі роботи

ABSTRACT

Purpose is the following are the main provisions of the use of the automated system of geomechanical modeling of mines and dumps based on the "K-MINE: Stability calculation" software product under the conditions of the Poltava GOK PJSC.

The methodology. Examples are given of the practical use of this automated system for solving application problems of determining the actual stability of the walls and benches of the mines and dumps, as well as determining their optimal structural parameters in terms of safety and environmental impact on the environment. The methodology for calculating the stability of stages and walls of the dumps consists in solving the problem of determining the safety factor of the walls with the maximum permissible parameters.

Findings. Calculated values obtained using K-MINE are accepted as the basis for new design solutions for pit mining and dump formation. The obtained estimated data favorably influence ecological situation in the area, allowing to minimize the disturbed lands areas for the allocation of dumps

with the further development of mining operations and the development of reserves.

Originality. The solution of the problem is provided by calculating the prism of possible collapse and the position of the slip plane in the dump rock massif at the specified maximum permissible dump parameters. After the construction of the prism of a possible collapse, its stability is calculated by the method of composition of forces. The obtained calculation result allows to judge the compliance of the selected profile of the dump wall with the resulting slope angle – the standard value of the safety factor for making a rational technological decision on ensuring the stability of the critical angle and height of the filled slope.

Practical implications. The results of calculations in the conditions of mining operations of the Poltava GOK PJSC performed using K-MINE allow preparing a feasibility study for the possibility of additional build-up of the wall heights by 5-7 stages (100-140 m) without changing the size of the dump borders in plan, which will allow to additionally allocate more than 500 million m³ of overburden rocks in them.

Keywords: *geomechanical modeling, mines, dumps, stability calculation, mining operations*

УДК 622.235

© Э.И. Ефремов, В.А. Никифорова, И.Л. Кратковский,
К.С. Ищенко, Е.В. Николенко

РАЗРУШЕНИЕ ТВЕРДЫХ СРЕД ПРИ ИХ РАЗНОГРАДИЕНТНОМ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ УДЛИНЕННЫМИ ЗАРЯДАМИ ПЕРЕМЕННОГО ДИАМЕТРА

© E. Efremov, V. Niikiforova, I. Kratkovsky, K. Ishchenko, E. Nikolenko

BLASTED BREAKING OF HARD MEDIUMS UNDER DIFFEREND GRADIENT LOADING BY ELONGATED CHARGES OF VARIABLE DIAMETER

Цель. Исследовать разрушающее действие взрыва удлиненных зарядов взрывчатых веществ (ВВ) переменного диаметра, обеспечивающих за счет разноградиентного нагружения твердых сред снижение энергоемкости их разрушения.

Методика исследований. Использован аналитический метод, основанный на фундаментальных положениях механики сплошных сред и физики взрыва, а также метод экспериментальных исследований на моделях с последующей обработкой результатов их взрывного разрушения.

Результаты исследований. Разноградиентное взрывное нагружение в объеме среды зависит от конструктивных особенностей удлиненных зарядов взрывчатых веществ и их расположения в разрушаемой среде. Экспериментами в полигонных условиях установлено, что при взрыве системы удлиненных зарядов ВВ переменного по их длине диаметра за счет пре-