

УДК 622.83:622.34 (575.2) (04)

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА “STRESS” ДЛЯ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ КАРЬЕРОВ

*С.Ф. Усманов* – канд. техн. наук, доцент

---

The description of the program complex Stress designed by KRSU is given in the article. Its structure is described. The method of failure surfaces making and estimations of pit walls stability by the numerical modeling is expounded. The result of the numerical modeling of the Kumtor's open pit slope is presented.

Современный уровень открытой добычи полезных ископаемых характеризуется непрерывным углублением карьеров, разработкой месторождений в сложных горно-геологических условиях. Эффективность горного производства, в первую очередь, зависит от выбора оптимальных геометрических параметров карьера. Устойчивость геотехнических объектов (бортов, уступов, отвалов, дамб и т.д.) определяет как безопасность ведения работ, так и себестоимость добычи. При проектировании карьеров необходимо установить такой предельный угол наклона борта, который обеспечит минимум вскрышных объемов и устойчивость горного массива в течение эксплуатации карьера. На устойчивость бортов карьеров влияет большое количество факторов, первостепенными являются геометрические параметры, структура горного массива, физико-механические свойства пород, динамическое воздействие массовых взрывов, климатические условия. Учесть все факторы – крайне сложная задача.

В настоящее время в научных исследованиях и инженерной практике широко применяются аналитические методы расчетов и конечно-разностные методы численного моделирования напряженно-деформированного состояния. Методы численного моделирования достаточно адекватно отображают реальные процессы, учитывают различные факторы, определяющие устойчивость горных склонов.

К наиболее распространенным программным средствам можно отнести пакеты Geo-Slope, Flag, Plaxis, Phaza.

В лаборатории Геоинформатики Кыргызско-Российского Славянского университета разработан программный комплекс STRESS. Моделирование напряженно-деформированного состояния горного массива выполняется методом конечных элементов.

Наряду с созданием комплекса STRESS для сравнительной оценки использовались программы Geo-Slope (Geo-Slope International Ltd., Канада) и Plaxis 7.1. (Plaxis B.V., Нидерланды).

Программный комплекс STRESS состоит из шести подсистем (рис. 1):

- ✓ автоматическое формирование конечно-элементной сетки, задания граничных условий и корректировки профиля склона;
- ✓ база данных физико-механических свойств горных пород;
- ✓ набор геомеханических моделей;
- ✓ подсистема формирования матрицы жесткости, решения системы уравнения и решения нелинейной задачи;
- ✓ подсистема ввода данных натурных наблюдений и корректировки геомеханической модели;
- ✓ подсистема графического представления результата и оценки устойчивости склона.

Основной акцент при разработке программы был сделан на то, чтобы обеспечить



Рис. 1. Структурная схема комплекса Stress.

простоту эксплуатации системы конечно-элементного моделирования. Это достигается наглядным интерфейсом, автоматизированным формированием конечно-элементной сетки и заданием граничных условий, максимально информативным представлением результата. Для формирования сетки конечных элементов разработан специализированный графический редактор, с помощью которого на экране монитора можно задать рассчитываемую область, разбить ее на конечные элементы, определить граничные условия. В качестве граничных условий задаются:

- стороны или отдельные узлы, смещение которых зафиксировано;
- сосредоточенные нагрузки к отдельным узлам;
- распределенные нагрузки к сторонам элементов;
- предварительно заданные смещения.

Задание физико-механических свойств пород производится из базы данных материалов. В настоящее время в базе данных хранятся механические свойства нескольких сотен горных пород.

Расчетный модуль содержит набор механических моделей среды. В этот набор входят: упруго-пластическая модель Кулона-Мора, вязкопластичная и вязкоупругая модели, упругая модель Юнга, модель сыпучей среды Соколовского, модель среды без растяжения Зенкевича. В системе Stress есть возможность учесть анизотропность свойств горных пород. Программная реализация моделей выполнена таким образом, чтобы имела возможность добавлять новые модели.

Адекватность геомеханических моделей и их программная реализация тестировались на следующих сравнениях:

- ↻ с аналитическим решением. Задача Галина [1];
- ↻ с физическим экспериментом. Моделирование разрушения откоса на центрифуге [2];
- ↻ с натурными наблюдениями. Сравнение с реально происшедшими обрушениями уступов борта карьера "Центральный" ПО "Апатит", Мурманская область [3];
- ↻ с результатами расчетов устойчивости отвалов на руднике Кумтор, полученных методом конечных разностей, с помощью программного комплекса FLAG [4].

Анализ сравнений показал высокую степень сходимости результатов численного моделирования, полученных при помощи системы STRESS.

Важным моментом численного моделирования напряженно-деформированного состояния является определение критерия устойчивости массива. Большинство программных продуктов, реализующих численное моделирование поля напряжений, ограничиваются только расчетами напряженного состояния. Это объясняется отсутствием критерия устойчивости горного массива по распределению напряжений. Достаточно распространены случаи, когда напряжения в отдельных областях превышают допустимые, а массив устойчив. Наличие зон пластических деформаций еще не говорит о разрушении массива в целом. Одним из критериев принят признак расходимости вычислительного процесса. Оценить устойчивость можно по распределению зон пластических деформаций и разрывных разрушений. Горный склон теряет устойчивость при выходе зон разрыва на свободную поверхность, что соответствует появлению трещин отрыва. Этот критерий подтверждается натурными наблюдениями.

В данной работе предлагается методика построения линии вероятного разрушения массива по результатам численного моделирования. Методика заключается в следующем: перпендикулярно склону с определенным шагом строятся эпюры максимальных касательных напряжений, определяются точки экстремума для каждой эпюры и эти точки соединяются в одну линию. Эта линия будет определять поверхность разрушения (рис. 2).

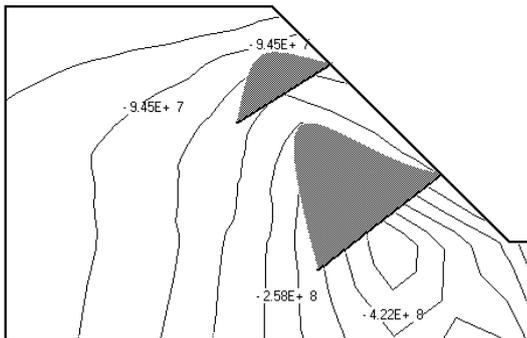


Рис. 2. Изолинии и эпюры касательных напряжений в откосе.

Коэффициент запаса устойчивости определяется вдоль линии вероятного разрушения по формуле:

$$K = \frac{\sum (C + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi) \Delta l}{\sum \tau \Delta l}, \quad (1)$$

где:  $\sigma_n, \tau$  – соответственно нормальные и касательные напряжения в середине отрезка,  $\varphi$  – угол внутреннего трения,  $C$  – сцепление,  $\Delta l$  – длина отрезка.

Большое внимание в системе Stress уделено максимально информативному представлению результатов. В системе предусмотрен вывод:

- ✓ изолиний по любой компоненте напряжений или смещений;
- ✓ распределений поля напряжений в виде цветовой гаммы;
- ✓ график распределений напряжений вдоль любого сечения;
- ✓ зон пластических деформаций и области разрыва;
- ✓ деформированного контура области.

Точность численного моделирования напряженно-деформированного состояния, в первую очередь, определяется достоверностью физико-механических свойств горных пород, используемых в расчетах. В связи с этим необходимо иметь полную базу данных физико-механических свойств пород. В разрабатываемой методике оценки устойчивости горных склонов значительная роль отводится базе данных материалов. Предусмотрена постоянная корректировка данных на основе непрерывного мониторинга смещений. В настоящее время для каждой породы в базе хранятся следующие параметры: модуль Юнга, коэффициент Пуассона, объемный вес, сцепление, угол внутреннего трения, коэффициент вязкости. С помощью программы STRESS проведен ряд расчетов напряженно-деформированного состояния для различных карьеров. Оценка устойчивости отвалов, расположенных на леднике (рудник Кумтор), позволила убедиться в возможности размещать вскрышные породы в непосредственной близости от рудника [5].

Значительный ущерб для экономики Кыргызстана принесло аварийное обрушение борта карьера на руднике Кумтор, происшедшее в июне 2002 г. Объем обрушенной массы составил около 2 млн. 700 тыс. м<sup>3</sup>. При этом высота обрушения 280 м и ширина по основа-

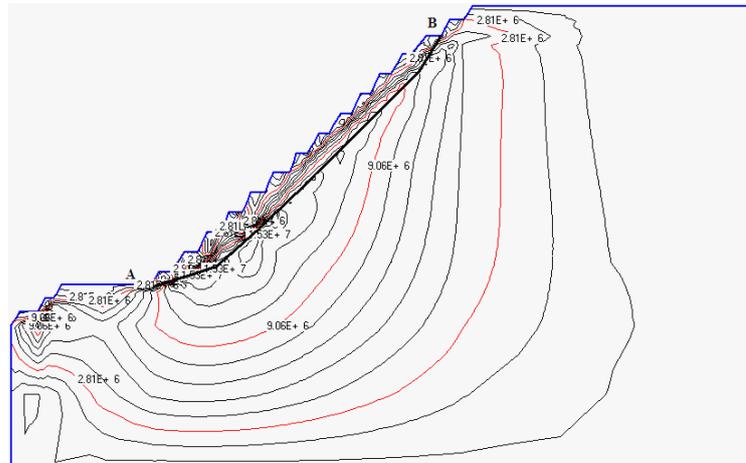


Рис. 3. Изолинии касательных напряжений.

нию 250 м. Погиб один сотрудник карьера. Независимые экспертные комиссии представили несколько точек зрения относительно причин обрушения. В связи с этим, исследование причин обрушения продолжается.

Нами был выполнен расчет напряженно-деформированного состояния предаварийного положения борта карьера. Массив рассматривался как однородный, состоящий из породы типа филлитов. Физико-механические свойства филлитов приняты следующие: модуль Юнга – 70 ГПа; коэффициент Пуассона – 0,25; объемный вес – 2,75 г/см<sup>3</sup>; сцепление – 5,54 МПа; угол внутреннего трения – 60°.

Как видно из рис. 3, можно четко выделить поверхность скольжения вдоль концентрации касательных напряжений (линия А–В).

Расчетный коэффициент запаса устойчивости по этой поверхности составляет 1,2, который в условиях повышенной сейсмичности, влияния массовых взрывов, сложной климатической обстановки, большим притоком грунтовых вод значительно снижен.

Распределение пластических деформаций совпадает с обрушенной впоследствии горной массой. В июле 2006 г. произошло еще одно обрушение массива, которое уже было вовремя отслежено наблюдательными станциями.

Проблема устойчивости бортов карьеров все больше приобретает актуальность в связи с увеличением размеров большинства карьеров, и решать ее необходимо в комплексе с численным моделированием поля напряжений.

Предложена новая методика оценки устойчивости по результатам моделирования напряженно-деформированного состояния горного массива.

Разработан современный программный комплекс STRESS, который обеспечивает высокую достоверность в оценке устойчивости горных склонов.

Опыт внедрения комплекса STRESS на производстве подтвердил его конкурентоспособность в сравнении с аналогичными системами.

#### Литература

1. Галин Л.А. Упруго-пластические задачи. – М.: Наука, 1984.
2. Okamura H., Katsuhiko S., Masatsugu A., Satoshi K., Osamu K. Experimental Study on Rock Slope Stability by the Use of a Centrifuge. Proc. 5. Cong. Int. Soc. Rock Mech. – Melbourne. – Apr. 1983. – Vol. 1. – Rotterdam.
3. Инженерная методика определения предельных углов откосов в глубоких карьерах / В.В. Григорьев, В.А. Коваленко, С.Ф. Усманов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1990. – №5. – С. 26–32.
4. Усманов С.Ф. Оценка устойчивости отвалов на руднике Кумтор // Тр. семинара “Автоматизированная подготовка производства на карьерах”. – Бишкек, 1999.
5. Коваленко В.А., Усманов С.Ф., Воробьев А.Е., Чунуев И.Т., Дүйшөналиев Ж.М. Оценка устойчивости отвалов высокогорного карьера Кумтор при отсыпке их на леднике // Горный журнал. – 2002. – №1. – С. 34–36.