

## ОБОСНОВАНИЕ ЗАПАСА УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ БОРТОВ КАРЬЕРОВ

Впервые вопрос устойчивости упругих тел был рассмотрен Эйлером, который получил дальнейшее развитие в работах Лагранжа. При этом сущность подхода Эйлера-Лагранжа заключалась в том, что потеря устойчивости упругих тел отождествляется с возникновением новых форм равновесия, близких к исходному, т.е. бифуркацией решения статистической задачи.

В горном деле, большой интерес при проектировании геотехнических систем представляют вопросы исследования устойчивого состояния равновесия породного массива как вблизи подземных горных выработок, так и открытых обнажений, так как результаты исследования позволяют понять процессы, происходящие в массиве и правильно оценить геомеханическую ситуацию вокруг этих выработок.

В настоящее время в мире разработаны и используются многочисленные методы оценки устойчивости бортов карьеров и отдельных откосов /1-5/. При этом имеются различные их классификации, построены графики и номограммы, составлены таблицы, облегчающие вычисления. Различны также подходы относительно формы и расположения в прибортовом массиве поверхности потенциального скольжения, которыми могут быть структурные особенности массива, тектонические нарушения, крупные трещины, поверхности контакта пород с различными физико-механическими и прочностными свойствами, а также поверхности стока грунтовых или подземных вод.

Большинство расчетных методов основано на представлении о горных породах как об идеально сыпучей среде, базирующейся на условиях предельного равновесия Кулона:

$$|\tau_n| = \sigma_n \operatorname{tg} \varphi + k, \quad (1)$$

где  $|\tau_n|$  и  $\sigma_n$  – соответственно касательное и нормальное напряжение по заданной площадке, н/м<sup>2</sup>;  $\operatorname{tg} \varphi$  - коэффициент внутреннего трения.

Решение задач осуществляется обычно двумя методами:

- предельного напряженного состояния;
- предельного равновесия.

Первая группа методов применима при случаях, когда условие предельного равновесия удовлетворяется лишь по некоторой внутренней границе массива (поверхности скольжения). Они также теоретически наиболее обоснованы, но для реальных массивов горных пород условие предельного напряженного состояния не выполняется. Введение в расчет характеристик

прочности, уменьшенных в  $n$  раз, где  $n$  – коэффициент запаса прочности, приводит к тому, что откос, находящийся в допредельном состоянии, рассчитывается методами предельного напряженного состояния.

Эти методы решения неприменимы также для породных массивов, у которых поверхности ослабления не совпадают с поверхностями скольжения. При этом получаемая вогнутая поверхность откоса с вертикальной стенкой в верхней части экономически нецелесообразна и практически неосуществима. Обычно это приводит к необходимости выполаживания откоса, в результате чего теряется основное необходимое достоинство методов – их точность. Также следует отметить, что использовать методы в большинстве случаев бывает затруднительно вследствие большой трудоемкости расчетов (за исключением некоторых случаев, когда решения доведены до состояния таблиц и номограмм). Еще одним видом идеальной среды является идеально связная, характеризующаяся только сцеплением. По своим свойствам к этой среде наиболее близки пластичные глины.

Горные породы при нагружении по многом подобны сыпучей среде, обладающей внутренней связью. Кроме этого, они имеют внутренние поверхности ослабления, а также способны воспринимать растягивающие напряжения. Вследствие этого горные породы наиболее реально рассматривать как сложную трещиноватую среду, к которой в механическом отношении применимы законы сыпучей среды. Разработанные на основе этой модели методы предельного равновесия нашли наиболее широкое распространение и применение.

Обычно оценка устойчивости откосов сводится к определению коэффициента запаса устойчивости для потенциальной поверхности скольжения. Коэффициент запаса устойчивости оценивается отношением суммы удерживающих сил (напряжений) к сумме сдвигающих сил (напряжений). Неустойчивость возникает тогда, когда сдвигающее усилие (напряжение), вызванное гравитацией, равно или больше удерживающего усилия (напряжение), определяемого за счет прочности пород на сдвиг. При этом формы поверхностей скольжения могут быть кругло цилиндрическими или плоскими. В некоторых случаях могут встречаться комбинации из круглоцилиндрических и плоских участков, а также иных поверхностей скольжения. Круглоцилиндрические поверхности скольжения обычно реализуются в однородных породах. При этом смещение массива рассматривается как вращение «жесткого клина» вокруг оси, параллельной простираению откоса и выступающей как ось тела вращения, поверхность которой и является осью скольжения. Если принять, что породный массив – среда изотропная, то сначала необходимо определить положение потенциальной поверхности скольжения, затем по ней проверяется устойчивость откоса. В анизотропных и нарушенных

породных массивах поверхность скольжения обычно фиксировано (заранее предопределена горно-геологическим строением массива), поэтому расчеты сводятся только к определению коэффициента устойчивости откоса.

Оценка устойчивости обнажений породного массива в настоящее время осуществляется в двух направлениях. Первое направление связано с дальнейшим обоснованием и совершенствованием инженерных методов расчета цилиндрических и плоских поверхностей скольжения. Второе - разработка методов, базирующихся на определении напряженно-деформированного состояния массива с применением различных математических моделей сред, и нахождение формы и положения вероятных поверхностей скольжения на основе вариационных принципов.

Практически все расчеты устойчивости основаны на концепции предельного пластического равновесия. При этом в большинстве методов используется только статистический подход на основе традиционных моделей сред. Для оценки устойчивости состояний породного массива вблизи выработок традиционных моделей недостаточно. Например, при идеальной пластичности переход к горизонтальным участкам происходит в момент достижения предела текучести. В этом случае должна произойти потеря устойчивости, но практика этого не подтверждает, так как породы на контуре выработок не разрушаются вплоть до исчерпания предельных пластических деформаций. В случае падающей диаграммы деформация  $\Delta\epsilon$  продолжается при снижающемся напряжении. На этом участке дополнительное напряжение  $\Delta\sigma$  выполняет отрицательную работу, т.е.  $\Delta\sigma \times \Delta\epsilon < 0$  — неустойчивость /6/, но процесс вполне устойчив. Если в массиве существуют трещины, то в кончике трещины при некотором увеличении ее роста напряжение достигает максимальной величины, затем при дополнительном приращении трещины напряжение стремится к нулю. Хотя в этом случае процесс происходит за пределом прочности, но признаки проявления неустойчивости всей системы не наблюдаются. Все эти примеры иллюстрируют то, что устойчивость определяется условиями нагружения и не всегда определяется положением точки на предельном графике деформирования пород.

При оценке устойчивости нами первоначально решается геомеханическая задача с использованием одной из моделей сред /7/ с учетом нетронутого состояния массива и прочностных и деформационных свойств пород. При этом находятся поля напряжений и деформаций вокруг выработок, устанавливаются зоны разрушения, зоны пластических деформаций и зоны упругости. Если зона разрушения полностью или частично охватывает контур выработки, порода, заключенная в этой зоне, неустойчива. Если вокруг выработок возникает зона пластических деформаций и, хотя эта зона полностью захватывает контур, это еще не означает, что породный массив неустойчив. В этих и других случаях при

оценке состояния породного массива необходимо определить коэффициент запаса устойчивости. Для этого в каждом элементе массива строятся изолинии  $\omega$ :

$$\omega = \tau_{\beta}^{np} - \tau_{\beta},$$

где  $\beta$  – угол между нормалью  $N$  площадке и направлением напряжения  $\sigma_1$ ;  $\tau_{\beta}^{np}$  – предельные касательные напряжения на площадке, определяемые по паспорту прочности;  $\tau_{\beta}$  – расчетные значения, полученные на основе решения нелинейной задачи.

Затем на изолинии с минимальным значением  $\omega$  определяем коэффициент запаса устойчивости по формуле

$$K = \frac{\sum_{i=1}^m \{ \operatorname{tg} \varphi_i [\sigma_{1i} (1 + \sin \varphi_i) + \sigma_{3i} (1 - \sin \varphi_i)] + 2C_i \}}{\sum_{i=1}^m (\sigma_{1i} - \sigma_{3i}) \cos \varphi_i},$$

где  $m$  – количество элементов, через которые проходит линия с минимальным значением  $\omega$ ;  $C_i$ ,  $\varphi_i$  – расчетные характеристики сцепления и угла внутреннего трения;  $i$  – разновидности пород,  $C_i = C_i / K$ ;  $\operatorname{tg} \varphi_i = (\operatorname{tg} \varphi / K)$ ,  $K$  – нормативный, заранее вводимый коэффициент запаса.

Состояние равновесия породного массива вблизи обнажений считается устойчивым, если  $K > 1$ , в противном случае (при  $K < 1$ ) – неустойчивым. Разработанный на основе численного метода конечных элементов и реализованный на компьютере способ оценки состояния породного массива позволяет решать широкий класс задач горного производства.

### Список литературы

1. Stability modeling with SLOPE/W/ An Engineering Methodology/ Geo-Slope International Ltd.Canada 2007.
2. Галустьян Э.Л. Методы оценки устойчивости откосов нагорных карьеров //Горный журнал. – 2002. – № 11-12. – С. 9-12.
3. Фисенко Г.Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов. – М.: Недра, 1965. – 378 с.
4. Тенгиев Ж.Т., Мекенбаев Б.Т., Кожахметов К.Х. Расчетные методы оценки устойчивости откосов. – Бишкек, 2000. – 163 с.
5. Усманов С.Ф. Прогнозирование устойчивости бортов высокогорных карьеров на основе моделирования напряженно-деформированного состояния / КРСУ. – Бишкек, 2009. – 172 с.
6. Петухов И.М., Линьков А.М. Механика горных ударов и выбросов. – М.: Недра, 1988.
7. Абдылдаев Э.К. Напряженно-деформированное состояние массива горных пород вблизи выработок. – Фрунзе: Илим, 1990. – 164 с.