ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАПАСА УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ ПО КРУГЛОЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ СКОЛЬЖЕНИЯ

Б.А. Храмцов, А.А. Ростовцева
Белгородский государственный университет

Под управлением откосами бортов карьеров понимают определение параметров откосов с достаточным, но не преувеличенным запасом прочности. Недостаточная прочность увеличивает риск возможного обрушения откосов и возникновения чрезвычайных ситуаций на производстве, а завышенный коэффициент запаса устойчивости откосов означает увеличение размеров карьера в плане, что приводит к росту вредного влияния открытой разработки на окружающую среду

Для решение задачи управления откосами карьеров был разработан аналитический метод расчета коэффициента запаса устойчивости откосов по круглоцилиндрической поверхности скольжения, который позволяет исключить погрешности, связанные с графическими построениями, а также выбирать параметры откосов в зависимости от заданного коэффициента запаса устойчивости, обеспечивая при этом требуемую точность результатов расчета.

Схема для расчета коэффициента запаса устойчивости откоса приведена на рисунке.

Коэффициент запаса устойчивости определяется по формуле

$$n = \frac{tg\varphi\left(I_1 + P_0 \sin\mu + P'_0 \cos\mu\right) + c\left(l_1 + l_2 + l_3\right) - I_3}{\left(I_2 + P_0 \cos\mu + P'_0 \sin\mu\right)}; \quad (1)$$

$$\mu = 45^0 - \frac{\varphi}{2}; \quad (2)$$

$$l_1 = 0{,}5B_0 \sin\mu; \quad (3)$$

$$l_2 = R\pi\left(\frac{90^0 - \alpha}{180^0}\right); \quad (4)$$

$$l_3 = \frac{\Delta H}{\sin\mu}; \quad (5)$$

$$P_0 = 0{,}25\gamma B_0\left(2H_{90} + 0{,}5B_0 ctg\mu\right); \quad (6)$$

$$P'_0 = 0{,}5\gamma\Delta H^2 ctg\mu; \quad (7)$$

$$H_{90} = \frac{2c}{\gamma} ctg\mu, \quad (8)$$

где I_l – сумма моментов удерживающих сил на участке VB, I_2 – сумма моментов сдвигающих сил на участке VB, I_3 – сумма моментов сдвигающих сил на участке SB, P_0 – вес призмы обрушения $DJWV$, P'_0 – вес призмы упора NCB, l_1 – длина прямолинейного участка поверхности скольжения

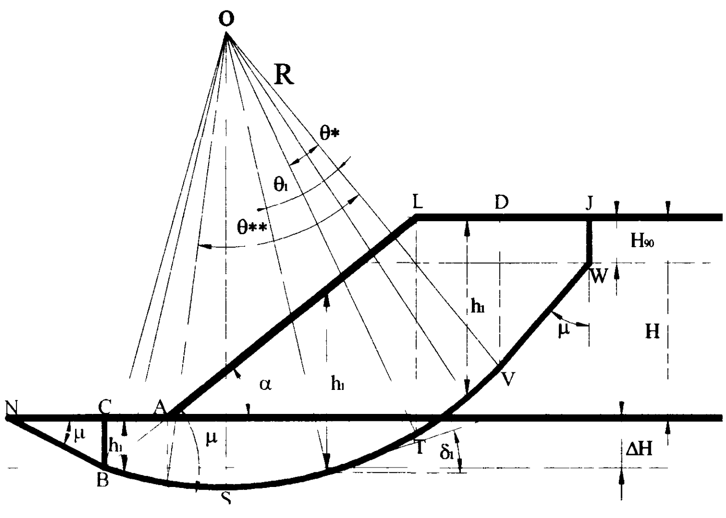

Схема к расчету коэффициента запаса устойчивости откоса

WV, l_2 – длина криволинейного участка поверхности скольжения *VTSB*, l_3 – длина прямолинейного участка поверхности скольжения *BN*, *c* – сцепление пород, φ - угол внутреннего трения пород, γ – объемный вес пород, слагающих откос, B_0 – ширина призмы возможного обрушения *LJ*, H_{90} – высота вертикальной трещины отрыва, ΔH – глубина возможного выпора в основании откоса *CB*, α – угол наклона откоса.

Суммы моментов удерживающих и сдвигающих сил вычисляются по следующим формулам:

$$I_1 = \int_0^{90^0-\alpha} P_i \cos\delta_i d\theta ; \qquad (9)$$

$$I_2 = \int_0^{90^0-\alpha} P_i \sin\delta_i d\theta ; \qquad (10)$$

$$I_3 = \int_{90^0-\mu}^{90^0-\alpha} P_i \sin\delta_i d\theta ; \qquad (11)$$

$$P_i = \gamma h_i dL \cos\delta_i ; \qquad (12)$$

$$dL = Rd\theta ; \qquad (13)$$

$$\delta_i = 90^0 - \mu - \theta_i , \qquad (14)$$

где P_i – вес *i*-го элементарного блока, δ_i – угол наклона *i*-й элементарной площадки скольжения к горизонту, *dL* – длина элементарной площадки скольжения, θ_i – центральный угол между положением радиуса *R* в точке *V* и в точке основания *i*-го блока, h_i – высота элементарного блока.

При $\theta_i \in (0;\theta^*)$ высота элементарного блока определяется по формуле

$$h_i = R\sin(\theta_i + \mu) - T ; \qquad (15)$$

$$T = R\sin\mu - 0{,}5B_0 ctg\mu - H_{90} , \qquad (16)$$

При $\theta_i \in (\theta^*;\theta^{**})$ высота элементарного блока

$$h_i = R\sin(\theta_i + \mu) + Rctg\alpha\cos(\theta_i + \mu) - T - (R\cos\mu - 0{,}5B_0). \qquad (17)$$

При $\theta_i \in (\theta^{**};90^0 - \alpha)$ высота элементарного блока находится из выражения

$$h_i = R\sin(\theta_i + \mu) - T - H . \qquad (18)$$

Угол θ^* и θ^{**} определяются по формулам

$$\theta^* = \left[\arccos\left(\cos\mu - 0{,}5\frac{B_0}{R}\right)\right] - \mu , \qquad (19)$$

$$\theta^{**} = arctg\left(\frac{R\sin(\mu-\alpha) - \Delta Hctg\alpha}{R\cos(\mu-\alpha)}\right) + (90^0 - \mu). \qquad (20)$$

Подставляя формулы (12) – (14) в выражения (9) – (11) и преобразуя их, получаем следующие значения сдвигающих и удерживающих сил:

$$I_1 = \int_0^{90^0-\alpha} \gamma h_i dL\cos^2\delta_i d\theta = \gamma R(\sin^2\mu \int_0^{90^0-\alpha} h_i\cos^2\theta_i d\theta + \sin 2\mu \int_0^{90^0-\alpha} h_i \sin\theta_i\cos\theta_i d\theta + \cos^2\mu \int_0^{90^0\ \alpha} h_i\sin^2\theta_i d\theta) = \gamma R\left(\sin^2\mu A_1 + \sin 2\mu A_2 + \cos^2\mu A_3\right) ; \qquad (21)$$

$$I_2 = \int_0^{90^0-\alpha} \gamma h_i dL\cos\delta_i\sin\delta_i d\theta = \gamma R\left(\int_0^{90^0-\alpha} h_i\frac{\sin 2\mu}{2}\cos^2\theta_i d\theta + \int_0^{90^0-\alpha} h_i 2\cos 2\mu\sin\theta_i\cos\theta_i d\theta - \int_0^{90^0-\alpha} h_i\frac{\sin 2\mu}{2}\sin^2\theta_i d\theta\right) = \gamma R\left(\frac{\sin 2\mu}{2}A_1 + 2\cos 2\mu A_2 - \frac{\sin 2\mu}{2}A_3\right) ; \qquad (22)$$

$$I_3 = \int_{90^0-\mu}^{90^0-\alpha} \gamma h_i dL\cos\delta_i\sin\delta_i d\theta = \gamma R(\int_{90^0-\mu}^{90^0-\alpha} h_i\frac{\sin 2\mu}{2}\cos^2\theta_i d\theta + \int_{90^0-\mu}^{90^0-\alpha} h_i 2\cos 2\mu\sin\theta_i\cos\theta_i d\theta - \int_{90^0-\mu}^{90^0\ \alpha} h_i\frac{\sin 2\mu}{2}\sin^2\theta_i d\theta) = \gamma R\left(\frac{\sin 2\mu}{2}A'_1 + 2\cos 2\mu A'_2 - \frac{\sin 2\mu}{2}A'_3\right); \qquad (23)$$

$$\begin{aligned}
A_1 &= R\sin\mu\left(\cos\alpha-\frac{\cos^3\alpha}{3}\right)+R\cos\mu\left(\frac{1-\sin^3\theta}{3}\right)-\left(R\cos(\mu-\alpha)-H\right)\left(\frac{\sin\theta^*\cos\theta^*+\theta^*}{2}\right)-\\
&-R\left(\cos(\mu-\alpha)-tg\alpha\sin(\mu-\alpha)\right)\left(\frac{\cos\alpha\sin\alpha+(90-\alpha)}{2}-\frac{\sin\theta^*\cos\theta^*+\theta^*}{2}\right)+\\
&+Rtg\alpha\cos\mu\left(\cos\alpha-\frac{\cos^3\alpha-\sin^3\theta^*}{3}-\sin\theta^*\right)-Rtg\alpha\sin\mu\left(\frac{\cos^3\theta^*-\sin^3\alpha}{3}\right),
\end{aligned} \tag{24}$$

$$\begin{aligned}
A_2 &= R\sin\mu\left(\frac{1-\sin^3\alpha}{3}\right)+R\cos\mu\left(\frac{\cos^3\alpha}{3}\right)-\left(R\cos(\mu-\alpha)-H\right)\left(\frac{1-\cos^2\theta^*}{2}\right)-\\
&-R\left(\cos(\mu-\alpha)-tg\alpha\sin(\mu-\alpha)\right)\left(\frac{\cos^2\theta^*-\sin^2\alpha}{2}\right)+\\
&+Rtg\alpha\cos\mu\left(\frac{\cos^3\theta^*-\sin^3\alpha}{3}\right)-Rtg\alpha\sin\mu\left(\frac{\cos^3\alpha-\sin^3\theta^*}{3}\right),
\end{aligned} \tag{25}$$

$$\begin{aligned}
A_3 &= R\sin\mu\left(\frac{\cos^3\alpha}{3}\right)+R\cos\mu\left(\frac{\sin^3\alpha+2}{3}-\sin\alpha\right)-\left(R\cos(\mu-\alpha)-H\right)\left(\frac{\theta^*-\sin\theta^*\cos\theta^*}{2}\right)-\\
&-R\left(\cos(\mu-\alpha)-tg\alpha\sin(\mu-\alpha)\right)\left(\frac{(90-\alpha)-\cos\alpha\sin\alpha}{2}-\frac{\theta^*-\sin\theta^*\cos\theta^*}{2}\right)+\\
&+Rtg\alpha\cos\mu\left(\frac{\cos^3\alpha-\sin^3\theta^*}{3}\right)-Rtg\alpha\sin\mu\left(\frac{\sin^3\alpha-\cos^3\theta^*}{3}-\sin\alpha+\cos\theta^*\right),
\end{aligned} \tag{26}$$

$$\begin{aligned}
A'_1 &= \left(R\sin\mu+Rtg\alpha\cos\mu\right)\left(\cos\alpha-\cos\mu-\frac{\cos^3\alpha-\cos^3\mu}{3}\right)+\\
&\left(R\cos\mu-Rtg\alpha\sin\mu\right)\left(\frac{\sin^3\mu-\sin^3\alpha}{3}\right)-\\
&-R\left[\cos(\mu-\alpha)-tg\alpha\sin(\mu-\alpha)\right]\left(\frac{\cos\alpha\sin\alpha+(90-\alpha)}{2}-\frac{\sin\mu\cos\mu+(90-\mu)}{2}\right),
\end{aligned} \tag{27}$$

$$\begin{aligned}
A'_2 &= \left(R\sin\mu+Rtg\alpha\cos\mu\right)\left(\frac{\sin^3\mu-\sin^3\alpha}{3}\right)+\left(R\cos\mu-Rtg\alpha\sin\mu\right)\left(\frac{\cos^3\alpha-\cos^3\mu}{3}\right)-\\
&-R\left(\cos(\mu-\alpha)-tg\alpha\sin(\mu-\alpha)\right)\left(\frac{\sin^2\mu-\sin^2\alpha}{2}\right),
\end{aligned} \tag{28}$$

$$\begin{aligned}
A'_3 &= \left(R\sin\mu+Rtg\alpha\cos\mu\right)\left(\frac{\cos^3\alpha-\cos^3\mu}{3}\right)+\\
&+\left(R\cos\mu-Rtg\alpha\sin\mu\right)\left(\frac{\sin^3\alpha-\sin^3\mu}{3}-\sin\alpha+\sin\mu\right)-\\
&-R\left[\cos(\mu-\alpha)-tg\alpha\sin(\mu-\alpha)\right]\left(\frac{(90-\alpha)-\cos\alpha\sin\alpha}{2}-\frac{(90-\mu)-\sin\mu\cos\mu}{2}\right)
\end{aligned} \tag{29}$$

Подставляя в выражение (1) значения из формул (2) – (7) и (21) – (23), вычисляем коэффициент запаса устойчивости откоса

Разработанный аналитический метод расчета коэффициента запаса устойчивости откоса реализован в компьютерной программе Otkos3, написанной на языке Turbo Pascal v 7 1, которая позволяет рассчитывать коэффициент запаса устойчивости откоса и его параметры с заданной точностью