

УДК 622.271.451.4

Ю.Г. Полкунов, А.А. Силкин, Р.Ш. Наимова

РАСЧЕТ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСА ОТВАЛА ПОД ДЕЙСТВИЕМ СОСРЕДОТОЧЕННОЙ НАГРУЗКИ

На карьере Мурунтау накоплен значительный опыт формирования высоких отвалов, в том числе бульдозерных с отсыпкой пород автомобильным транспортом. Существующая документация регламентирует безопасные параметры разгрузочной площадки для автомобилей до 75-80 т. Поэтому при грузоподъемности автомобилей в 2 раза и более и, соответственно их значительной стоимости, возникает задача в определении действительных размеров призмы возможного оползания.

Существующие методики расчета [1, 2] безопасных параметров призмы возможного оползания основываются на методах подбора потенциальной поверхности скольжения. Поэтому расчет поверхностей скольжения при решении плоской задачи теории упругости с последующим рассмотрением объемной поверхности разрушения позволит достоверно вычислить коэффициент устойчивости k_y .

Напряженно-деформированное состояние верхней бровки откоса отвала, где приложена внешняя нагрузка от колеса автомобиля P , рассчитывалось с использованием метода граничных интегральных уравнений (ГИУ) [3] по схеме, приведенной на рис. 1, при условии, что внутри области, описывающей породный массив, приложены объемные силы тяжести.

Сравнительный анализ напряженного состояния плоской деформации, формирующегося под действием объемных сил тяжести и при воздействии внешней нагрузки, выполнен для нормальных σ_x , σ_y (рис. 2, а-г) и касательного τ_{xy} (рис. 2, д, е) напряжений. При этом установлено, что изолинии нормального напряжения σ_y , формирующими-ся под действием силы тяжести, полностью соответствуют гидростатическому распределению, то есть имеют горизонтальное простижение, а величина напряжений плавно возрастает с глубиной.

Нормальные напряжения σ_x из-за влияния откоса превышают σ_y примерно в 10 раз, концентрация σ_x равномерная, но незначительно возрастает в зоне выхода нулевой изолинии касательного напряжения τ_{xy} на горизонтальную поверхность откоса отвала (~ 5 м от кромки откоса при высоте откоса 10 м).

При воздействии внешней вертикальной нагрузки от транспортного или иного оборудования, приложенной на расстоянии m от кромки откоса на площадке длиной l , картина распределения напряжений в области действия силы резко меняется. Изолинии напряжения σ_y , следя классиче-

ской задаче о воздействии единичной силы на полуплоскость [4], по линии центра приложения силы смещаются к поверхности откоса, и концентрация их значительно возрастает (\sim в 10 раз). Концентрация изолиний напряжения σ_x также возрастает по линии приложения вертикальной нагрузки, но незначительно (\sim в 1,5 – 2,0 раза), а $\tau_{xy} \sim$ в 10 раз, причем нулевая изолиния τ_{xy} смещается вблизи поверхности к вертикальной линии приложения нагрузки.

Функция прочности, полученная аналитически из критерия прочности, описанного в [5], определяется соотношением σ_x , σ_y и τ_{xy} в каждой точке породного массива.

На рис. 1, а изображены изолинии функции прочности при воздействии на отвал внешней нагрузки, построенной на основе рассчитанных нормальных $\sigma_{x,y}$ и касательных τ_{xy} напряжений по выражению

$$F(\sigma_{x,y}, \tau_{xy}, C, \varphi) = (\sigma_x + \sigma_y + 2 \cdot C \cdot \operatorname{ctg} \varphi)^2 \times \sin^2 \varphi - \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2 \right], \quad (1)$$

где τ_{xy} – касательные напряжения на площадках скольжения, МПа; C – сцепление, МПа; $\sigma_{x,y}$ – составляющие компоненты нормального напряжения на площадках скольжения, МПа; φ – угол внутреннего трения, град.

Концентрация τ_{xy} по линии приложения вертикальной нагрузки создает условия для возникновения трещины отрыва у поверхности в месте, где касательное напряжение меняет знак (рис. 2, е). Затем процесс разрушения распространяется по траектории минимального градиента функции прочности $F(\sigma_{x,y}, \tau_{xy}, C, \varphi)$ к поверхности откоса к точке A . Траектория аппроксимируется окружностью, центр которой определяется пересечением прямых O_1A и O_1B .

Прямая O_1A – нормаль к горизонтальной поверхности отвала, проходящая через точку A .

Координаты точки C определяются границей приложения вертикальной нагрузки на поверхности откоса: $C_x = m + 0,5l$; $C_y = 0$. Затем из точки B – середины отрезка AC – восстанавливается перпендикуляр до пересечения с прямой O_1A . Точка пересечения есть центр искомой окружности.

При воздействии на поверхность отвала одного колеса на нем образуется циркообразная трещина, радиус которой равен AC (рис. 1, б). Таким образом формируется поверхность скольжения в форме сферы с центром в точке O_1 и ра-

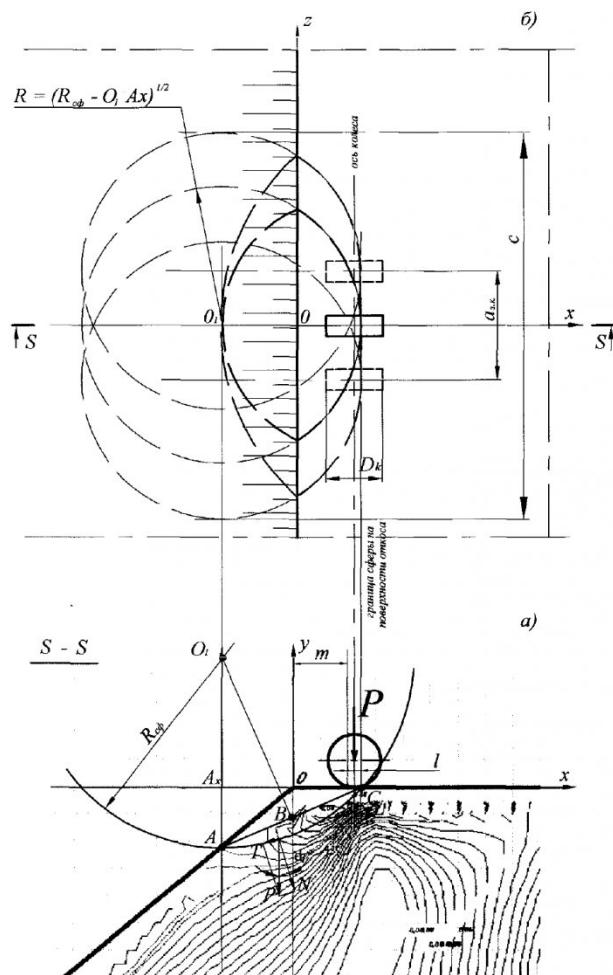


Рис. 1. Расчетная схема на основе формирующихся линий уровня функции прочности при взаимодействии системы колесо - породы отвала: а) сечение S-S; б) вид в плане. Обозначения: D_k - диаметр колеса, P - нагрузка на ось колеса, I - длина контакта колеса с отвалом, t - ширина платформы безопасности, a_{3K} - ширина колеи задних колес

диусом O_iA . При воздействии двух колес на поверхность отвала поверхность скольжения формируется в форме вытянутого эллипсоида вдоль оси Z. Наибольшая ось эллипсоида равна $C=2 \cdot A_x D + a_{3K}$, где a_{3K} – ширина колеи задних колес.

Для расчета коэффициента устойчивости на графиках с изолиниями функции прочности определяются координаты точек А и С. По описанному выше алгоритму формируется поверхность скольжения при воздействии одного колеса – по сферической поверхности и при воздействии двух колес – по эллипсоидальной поверхности.

Затем определяются нормальная N и горизонтальная T составляющие сферического или эллипсоидального сегмента, ограниченного поверхностью скольжения, наклонной и горизонтальной поверхностями отвала по выражениям:

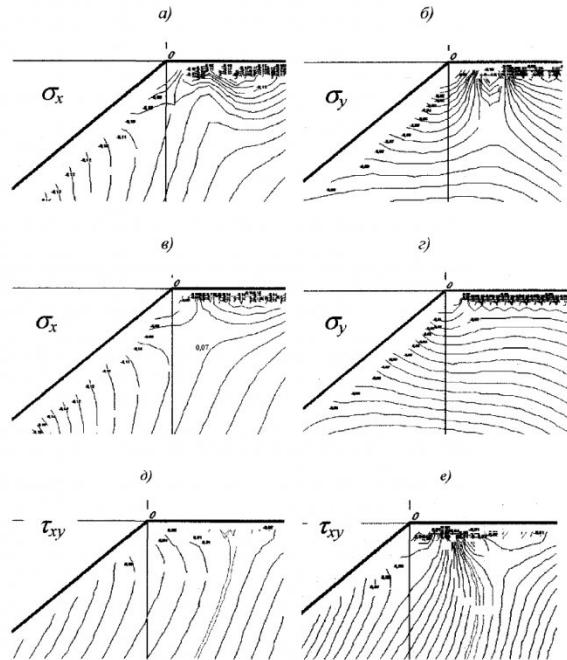


Рис. 2. Нормальные и касательные напряжения, формирующиеся в откосе от воздействия сил тяжести (а, б, д) и при воздействии внешней нагрузки (в, г, е).

$$N = \gamma \cdot \int_{-R_0}^{-Y_0} \left\{ \frac{\sqrt{R_o^2 - y^2}}{Y_0 + R_0} \varphi(x, y) \cdot \cos(\arcsin \frac{x}{R_0}) dx \right\} dy;$$

$$T = \gamma \cdot \int_{-R_0}^{-Y_0} \left\{ \frac{\sqrt{R_o^2 - y^2}}{Y_0 + R_0} \varphi(x, y) \cdot \cos(\arcsin \frac{x}{R_0}) dx \right\} dy,$$
(2)

где X_0, Y_0 – координаты центра сферы или эллипсоида; R_0 – радиус сферы или эллипсоида в плоскости $Z = 0$; $\varphi(x, y) = \sqrt{R_0^2 - x^2 - y^2}$ – подинтегральное выражение для сферы и

$$\varphi(x, y) = c \cdot \sqrt{1 - \frac{x^2}{R_0^2} - \frac{y^2}{R_0^2}} \text{ для эллипсоида.}$$

Площадь сегмента сферы или эллипсоида, формирующих поверхность скольжения, равна

$$S = \gamma \cdot \int_{-R_0}^{-Y_0} \left\{ \frac{\sqrt{R_0^2 - y^2}}{\psi(x, y)} dx \right\} dy, \quad (3)$$

где $\psi(x, y) = \frac{R_0}{\sqrt{R_0^2 - x^2 - y^2}}$ – подинтегральная

функция для сферы и для эллипсоида

$$\psi(x, y) = c \times \sqrt{1 + \frac{c^2 \cdot x^2}{R_0^4 (1 - \frac{x^2}{R_0^2} - \frac{y^2}{R_0^2})} + \frac{c^2 \cdot y^2}{R_0^4 (1 - \frac{x^2}{R_0^2} - \frac{y^2}{R_0^2})}}.$$

Коэффициент устойчивости определяется по потенциальной поверхности скольжения с учетом внешней нагрузки P .

Ниже приведен расчет безопасных параметров разгрузочной площадки для автомобиля CATERPILLAR 789B. Диаметр шины автомобиля 37,00-R57 $D_k=3300$ мм; $a_{z,k} = 4622$ мм.

m, m	2	2,5	3	4	5
A_0, m	4,06	4,87	4,87	4,87	4,87
K_y	От колеса	0,474	0,728	0,798	0,948
	От задней оси	0,469	0,713	0,771	0,898

По рекомендациям производителя при расчете нагрузки на колесо принято, что 66,4 % массы нагруженного автомобиля приходится на заднюю ось. При максимальном весе автомобиля, равном 3114871,2 Н, нагрузка на заднее колесо составляет 1034137 Н, а удельная нагрузка при ширине спаренных задних колес $B=2304$ мм и длине площадки контакта $l=1,0$ м равна $q_k = 0,449$ МПа.

На рис. 3 показано изменение взаимоположения изолиний прочности в породном откосе ($\gamma = 20000$ Н/м³, $C = 0,005$ МПа, $\varphi = 27^\circ$, $\alpha = 38^\circ$) в зависимости от величины m . Сплошной линией показана линия скольжения, проходящая по траектории минимального градиента изолиний функции прочности – четко прослеживается только при величине $2 \leq m \leq 4,6$ м. При $m \geq 5$ м концентрация изолиний функции прочности возрастает в

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Фисенко Г.Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов. - М.: Недра, 1965. 378 с.
- Попов И.И., Окатов Р.П. Борьба с оползнями на карьерах.- М.: Недра, 1980. 283 с.
- Бендержи П., Баттерфилд Р. Метод граничных элементов в прикладных науках. - М.: Мир, 1984. 494 с.
- Тимошенко С.П., Гудьеर Дж. Теория упругости. – М.: Наука, 1975. 576 с.
- Булычев Н.С. Механика подземных сооружений в примерах и задачах. – М.: Недра, 1989. 270 с.

□ Авторы статьи:

Полкунов

Юрий Григорьевич

- докт. техн. наук, проф. каф.
горных машин и комплексов

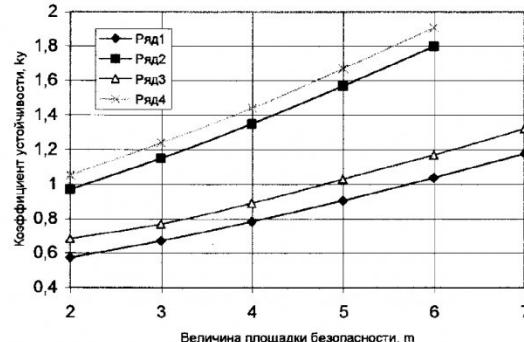


Рис.4. Зависимость коэффициента устойчивости K_y от величины площадки безопасности m для автомобиля CATERPILLAR 789B при: 1 - $\gamma = 0,02$ МН, $\varphi = 27^\circ$, $C = 0$; 2 - $\gamma = 0,02$ МН, $\varphi = 27^\circ$, $C = 0,0242$ МПа; 3 - $\gamma = 0,0256$ МН, $\varphi = 27^\circ$, $C = 0$; 4 - $\gamma = 0,0256$ МН, $\varphi = 27^\circ$, $C = 0,0242$ МПа

области массива под местом приложения внешней силы, а траектория минимального градиента направлена вглубь массива, то есть откос устойчив.

Расстояние A_0 определяется в зависимости от угла α и координата A_y по выражению $A_0 = A_y / \sin \alpha$ и для различных m приведено в таблице.

Таблица

m, m	2	2,5	3	4	5
A_0, m	4,06	4,87	4,87	4,87	4,87
K_y	От колеса	0,474	0,728	0,798	0,948
	От задней оси	0,469	0,713	0,771	0,898

Далее с использованием (2) – (3) определяется коэффициент устойчивости (см. табл.), значение которого больше единицы при $m \geq 5,0$ м, что и было определено в ходе анализа изолиний функции прочности. На рис. 4 приведены значения коэффициента устойчивости от величины площадки безопасности m для возможных условий работы указанного автомобиля при различных плотности и сцепления пород отвала.

Таким образом, учет формирующегося под действием объемных сил и внешних нагрузок напряженно-деформированного состояния откоса и объемного фактора позволяет достоверно рассчитывать коэффициент устойчивости и определять безопасные параметры разгрузочной площадки для автомобилей.

Силкин

Александр Августович

- канд.техн.наук, начальник научно-исследовательского отдела
«СредазНИИПИпромтехнологии»

Наимова

Р.Ш.