

АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ПРОГНОЗА УСТОЙЧИВОСТИ ГРУНТОВОЙ ДАМБЫ

Гурьев Дмитрий Витальевич (аспирант, КузГТУ им. Т. Ф. Горбачева);
 Караблин М.М. (ведущий инженер ОАО "Кузбассгипрошахт")
 Научный руководитель: Бахаева Светлана Петровна, д.т.н., профессор
 Кузбасский государственный технический университет
 имени Т.Ф. Горбачева
 г. Кемерово

Зачастую на горнопромышленных предприятиях необходимо проведение оперативной оценки устойчивости грунтовой дамбы с целью определения ее технического и эксплуатационного состояния. Одним из критериев надежности дамб является коэффициент запаса устойчивости, характеризуемый минимальным отношением обобщенных предельных реактивных сил сопротивления к активным сдвигающим силам. В большинстве случаев определение коэффициента запаса является трудоемкой задачей и эксплуатационный персонал не имеет возможности оперативной оценки надежности грунтовой дамбы. Поэтому возникает необходимость в автоматизации расчета устойчивости.

Параметрами для моделирования напряженно-деформированного состояния грунтовой дамбы являются: поверхность откосов, линия контакта с основанием, гребень, поверхность скольжения. В графическом виде указанные параметры представляются прямыми, реже кривыми линиями, находящимися в одной плоскости. Для моделирования отдельных элементов дамбы использована прямоугольная система координат, началом которой принята нижняя бровка низового откоса, ось абсцисс совпадает с линией горизонта, ось ординат отражает высотные отметки. Положение элементов на плоскости определено уравнениями в координатной форме, представленными в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Уравнения элементов грунтовой дамбы

Элемент	Уравнение	Переменные формул
Низовой откос	$y_i^{н.о.} = \frac{x_i}{m_1}$	m_1, m_2 – коэффициенты заложения соответственно низового и верхового откосов; h_d – высота насыпного сооружения, м; b – ширина гребня, м; α – угол наклона основания, град.
Гребень	$y_i^{гp.} = h_d$	
Верховой откос	$y_i^{в.о.} = -\frac{x_i}{m_1} + \frac{m_2 h_d + b}{m_1} + h_d$	
Основание	$y_i = x_i \tan \alpha$	

Описание положения поверхности скольжения в теле дамбы и основании производится уравнением, определенным на основе геометрических построений и методов аналитической геометрии. Поверхность скольжения в теле дамбы на горизонтальном прочном основании (рисунок 1) представлена кривой, по форме близкой к тангенциальной:

$$y_i = x_i \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_{1-5}}{x_5} x_i\right). \quad (1)$$

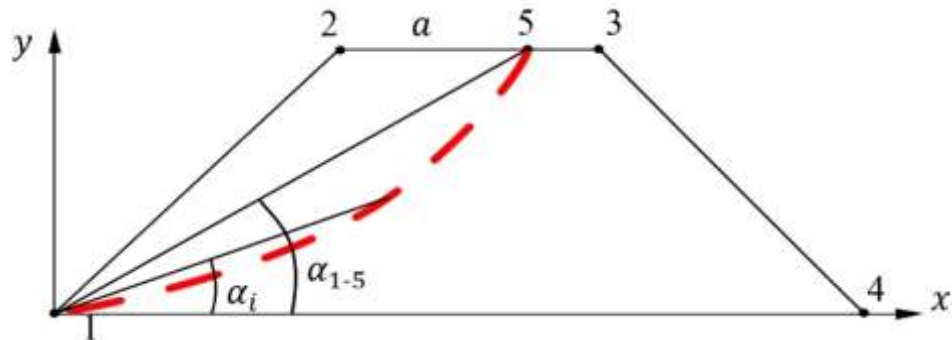


Рисунок 1. Схема построения поверхности скольжения в теле дамбы на горизонтальном прочном основании

При наличии горизонтального слабого основания (рисунок 2) поверхность скольжения в теле дамбы имеет круглоцилиндрическую форму:

$$y_i = y_{O_1} - \sqrt{R^2 - (x_i - x_{O_1})^2}; \quad (2)$$

в основании – близка к дуге окружности:

$$y_i = y_{O_2} - \sqrt{\left(l_{5-O_2} + \Delta_R(l_{7-5} - x_i + x_7)\right)^2 - (x_i - x_{O_2})^2}. \quad (3)$$

где Δ_R – изменение радиуса от l_{5-O_2} до l_{7-O_2} .

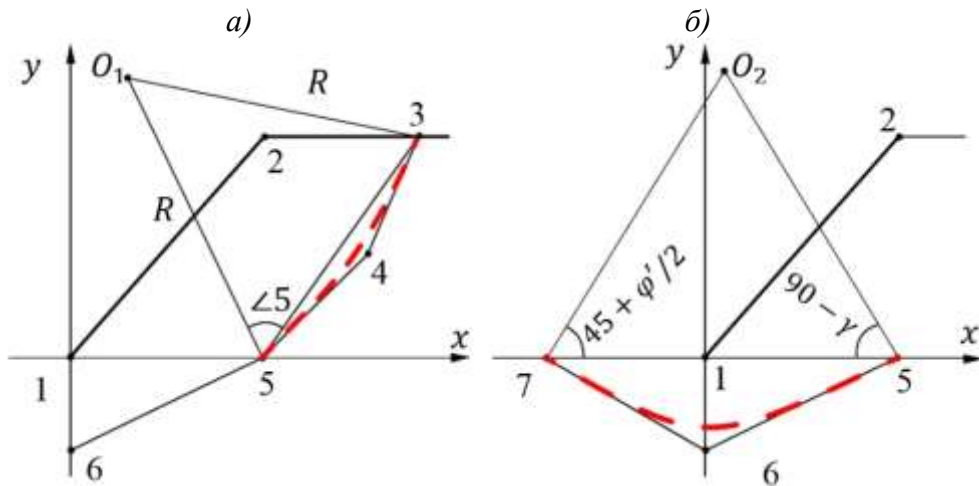


Рисунок 2. Форма поверхности скольжения для дамбы на горизонтальном слабом основании: в массиве (а) и слабом основании (б)

В теле дамбы с наклонным слоистым основанием (рисунок 3) поверхность скольжения также круглоцилиндрической формы:

$$y_i = y_{O_3} - \sqrt{R^2 - (x_i - x_{O_3})^2}; \quad (4)$$

в основании совпадает с линией контакта:

$$y_i = x_i \operatorname{tg} \alpha. \quad (5)$$

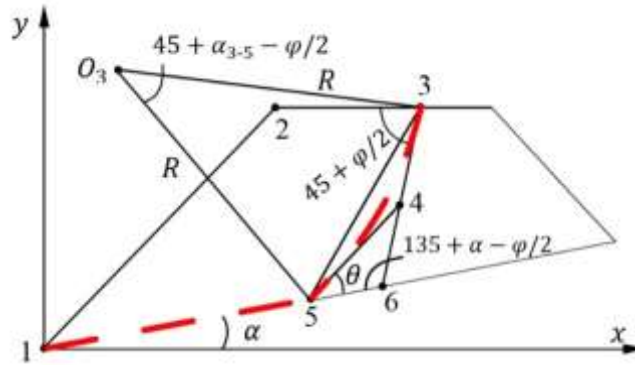


Рисунок 3. Построение ломаной линии в теле дамбы на наклонном слоистом основании

Поверочные расчеты равновесия сдвигающих и удерживающих сил (алгебраического и векторного сложения сил [2]) подразумевают разбиение тела оползня на элементарные блоки, три границы которых – прямые линии (боковые грани и линия откоса), а четвертая – кривая (поверхность скольжения). По известным координатам угловых точек установлены геометрические параметры блока и действующие на них силы (таблица 2).

ТАБЛИЦА 2. Параметры элементарных блоков и нагрузок

Параметры	Уравнение	Переменные формул
Длина основания l_i	$l_{i\text{осн}} = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}$	$y_{i+1}^{B.L}, y_i^{B.L}$ – последующая и предыдущая ординаты вышележащей линии (линия низового откоса или гребня); y_{i+1}, y_i – последующая и предыдущая ординаты поверхности скольжения; ρ – плотность, т/м ³ и C – сцепление грунтов, т/м ²
Угол наклона основания α_i	$\alpha_i = \text{tg}^{-1} \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i}$	
Длина боковой грани $l_{i\text{бок}}$	$l_{i\text{бок}} = \sqrt{(x_i^{B.L} - x_i)^2 + (y_i^{B.L} - y_i)^2}$	
Вес P_i	$P_i = S_i \rho$	
Силы сцепления по основанию $C_{i\text{осн}}$	$C_{i\text{осн}} = C l_{i\text{осн}}$	
Силы сцепления по боковой грани $C_{i\text{бок}}$	$C_{i\text{бок}} = C l_{i\text{бок}}$	
Площадь S_i	$S_i = 0,5[(x_i^{B.L} - x_i)(y_i^{B.L} + y_i) + (x_i - x_{i+1})(y_i + y_{i+1}) + (x_{i+1} - x_{i+1}^{B.L})(y_{i+1} + y_{i+1}^{B.L}) + (x_{i+1}^{B.L} - x_{i+1})(y_{i+1}^{B.L} + y_i^{B.L})]$	

Надежность дамбы при расчете методом алгебраического сложения сил оценивают по величине коэффициента запаса устойчивости:

$$k_f = \frac{\text{tg } \varphi \sum (P_i \cos \alpha_i) + C \sum l_i}{\sum P_i \sin \alpha_i}; \quad (6)$$

методом векторного сложения сил – по величине невязки многоугольника сил, вычисляемой аналитически через координаты его угловых точек в условной системе координат.

Алгоритм аналитического расчета коэффициента запаса устойчивости по наиболее напряженной поверхности скольжения для дамб на горизонтальном прочном и слабом, а также наклонном слоистом основаниях приведен на рисунке 5 и реализован в программе для ЭВМ "Устойчивая насыпь" [3].

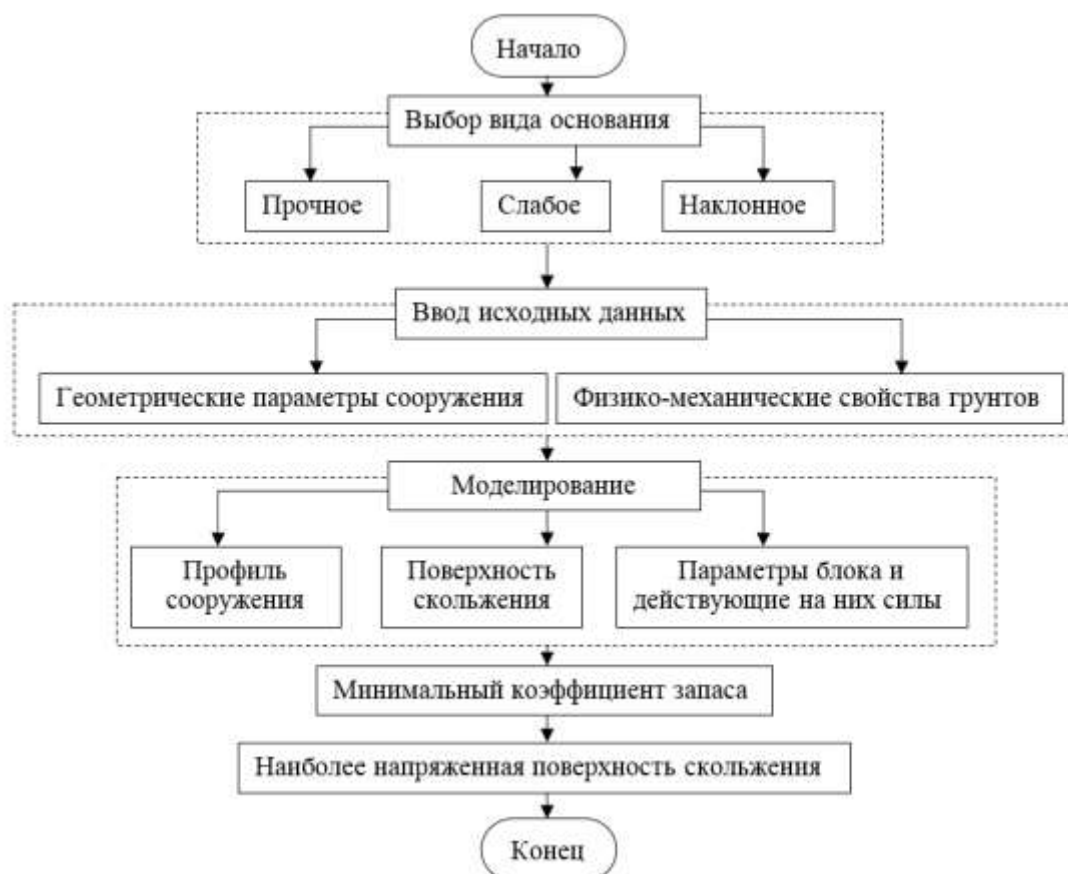


Рисунок 5. Алгоритм расчета минимального коэффициента запаса устойчивости

Список литературы:

1. СП 39.13330.2012. Плотины из грунтовых материалов – М. : Мин-регион России, 2012.
2. Правила обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах – СПб. : ВНИМИ. – 1998. – 208 с.
3. Свидетельство № 2015617755 о государственной регистрации программы для ЭВМ "Устойчивая насыпь" / авт. Гурьев Д. В., Караблин М. М. // заявл. 23.04.2015; №2015613416; зарегистр. 22.07.2015.
4. Гурьев Д. В. Обобщение характеристик дисперсных грунтов техногенных массивов на примере Кузбасса / Д. В. Гурьев // Вестник КузГТУ. – 2015. – №3. – С. 31-36.