

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА УСТОЙЧИВОСТИ ГРУНТОВЫХ ОТКОСОВ И СКЛОНОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕОРИИ ОПТИМИЗАЦИИ

Андреев В.С.

*Кандидат технических наук
Днепропетровский национальный университет
железнодорожного транспорта
имени академика В. Лазаряна*

Шаповал В. Г.

*Доктор технических наук
ГВУЗ «Национальный горный университет»*

Причина Е. С.

*Кандидат технических наук
ГВУЗ «Национальный горный университет»*

Аннотация

В статье обоснован алгоритм расчета устойчивости грунтовых откосов и склонов с использованием элементов теории оптимизации. Его отличием от общепринятых алгоритмов расчета является учет всех уравнений статики.

Ключевые слова: коэффициент устойчивости, откос (склон), уравнения статики.

ALGORITHM OF DETERMINATION OF THE COEFFICIENT OF THE STABILITY OF GROUND COILS AND SLOPES WITH THE USE OF ELEMENTS OF THE OPTIMIZATION THEORY

Andriev, V. S.

*Candidate of Technical Sciences,
Dnipropetrovsk National University of Railway Transport
named after academician V. Lazaryan*

Shapoval, V. HR.

*Doctor of Technical Sciences,
National Mining University (Dnepr)*

Prychyna, K.S.

*Candidate of Technical Sciences,
National Mining University (Dnepr)*

Abstract

The article substantiates the algorithm for calculating the stability of soil slopes and slopes using elements of optimization theory. Its difference from the generally accepted calculation algorithms is the inclusion of all the equations of statics.

Keywords: coefficient of stability, slope (slope), equations of statics

Существующие в настоящее время методы определения коэффициента устойчивости условно можно разбить на две больших группы – методы, базирующиеся на использовании элементов механики сплошной среды и методы, в которых в той или иной мере применяется принцип разбивки основания на отдельные отсеки [1, 2].

Следует также отметить, что так называемые вариационные методы [3, 4] в которых также подразумевают процесс разбивки сползающего грунтового массива на отдельные отсеки.

Поскольку методы, использующие элементы механики сплошной среды не позволяют выполнять расчеты при коэффициенте устойчивости K_u ,

меньшем единицы, они имеют ограниченную область применения (например, с этих методов невозможно выполнить расчет противооползневых сооружений при $K_u < 1$), в настоящей работе они не будут рассмотрены.

Также не будут рассмотрены вариационные методы расчета, поскольку их использование при расчете имеющих слоистую текстуру откосов и склонов весьма затруднительно.

Далее остановимся на особенностях наиболее распространенных в настоящее время методах определения коэффициента устойчивости откосов и склонов, в основу которых положена процедура их разбивки на отсеки.

Необходимо отметить, что наибольшее распространение получили такие методы определения коэффициента устойчивости откосов и склонов [1, 5]:

- метод прямолинейной поверхности скольжения;
- метод круглоцилиндрической поверхности скольжения;
- метод ломаной поверхности скольжения;
- метод Маслова-Берера;
- метод Г.М. Шахунянца.

Всем этим методам расчета присущ один общий недостаток: один (единственный) коэффициент ползучести откоса (склона), определяется как отношение суммы удерживающих усилий (т.е. сил или моментов) к сумме сдвигающих.

При этом, как правило, не принимается во внимание, что усилия являются векторами и для обеспечения устойчивости откоса (склона) необходимо выполнение всех уравнений статики (трех – в условиях плоской и шести – в условиях пространственной задачи).

Иными словами, для корректного решения задачи мы должны определить не один, а несколько (три – в условиях плоской и шести – в условиях пространственной задачи) коэффициента устойчивости откоса (склона) и из них выбрать наименьший.

В этой связи представляют интерес выполненные автором работы [6] применительно к степенной поверхности скольжения исследования, в ходе которых для определения устойчивости откосов и склонов было предложено использовать методы теории оптимизации.

При написании настоящей работы нами преследовалась цель выработать общий подход к определению устойчивости откосов и склонов с использованием элементов теории оптимизации [7, 8].

Для простоты изложения материала ограничимся плоской задачей (рис. 1).

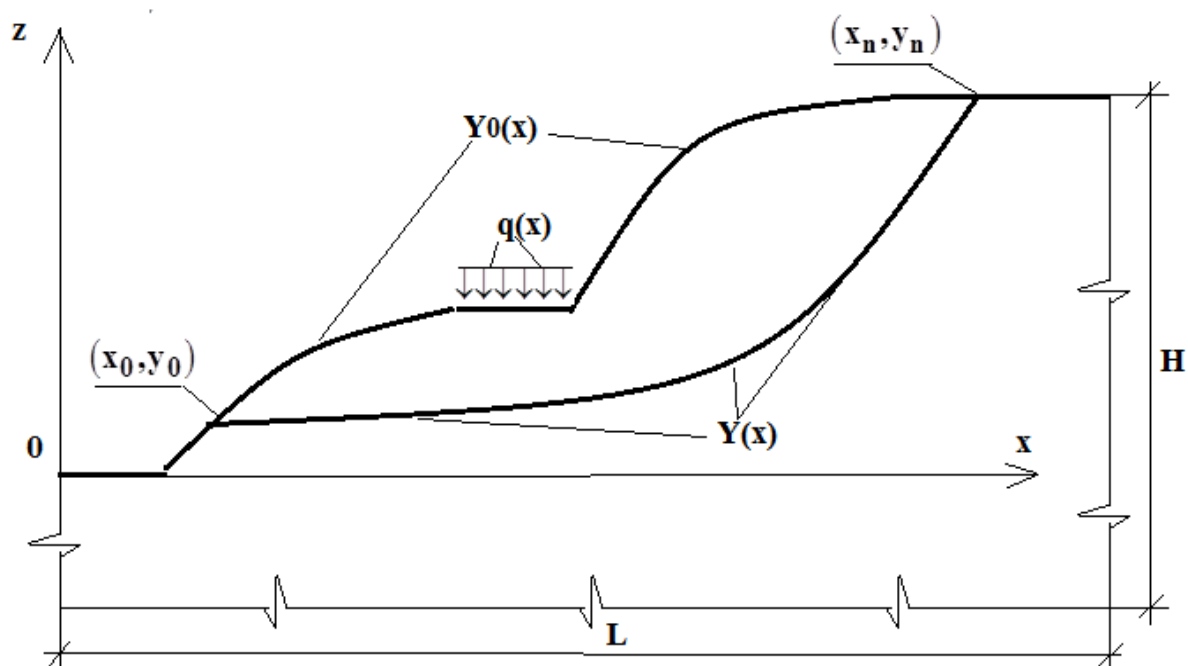


Рис. 1. К расчету устойчивости склона

Вначале рассмотрим случай, когда начало кривой скольжения (точка (x_0, y_0) на рисунке 1), конечная точка кривой скольжения (точка (x_n, y_n) на рисунке 1) и кривая скольжения $Y(x)$ известны заранее. Такая ситуация имеет место, когда выполняется оценка устойчивости т.н. «старого оползня». В этом случае для обеспечения устойчивости грунтового массива должны выполняться три уравнения статики:

$$\left. \begin{aligned} \sum X &= \sum_{i=1}^n (T_{i,x}^{y\partial} - k_x \cdot T_{i,x}^{c\partial}) = 0; \\ \sum Y &= \sum_{i=1}^n (T_{i,y}^{y\partial} - k_y \cdot T_{i,y}^{c\partial}) = 0; \\ \sum M &= \sum_{i=1}^n (M_i^{y\partial} - k_m \cdot M_i^{c\partial}) = 0; \end{aligned} \right\}, \text{ откуда}$$

$$\left. \begin{aligned} k_x^y &= \sum_{i=1}^n T_{i,x}^{y\partial} / \sum_{i=1}^n T_{i,x}^{c\partial}; \\ k_y^y &= \sum_{i=1}^n T_{i,y}^{y\partial} / \sum_{i=1}^n T_{i,y}^{c\partial}; \\ k_m^y &= \sum_{i=1}^n M_i^{y\partial} / \sum_{i=1}^n M_i^{c\partial}; \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где $\sum X$ и $\sum Y$ – проекции действующих по подошве сползающего грунтового массива на координатные оси OX и OY соответственно, а $\sum M$ – сумма действующих на него опрокидывающих моментов;

$T_{i,x}^{y\partial}, T_{i,y}^{y\partial}$ – проекции на координатные оси

действующих в пределах i -того отсека удерживающих сил;

$M_i^{y\partial}$ – то же, удерживающих опрокидывающих моментов;

$T_{i,x}^{c\partial}, T_{i,y}^{c\partial}$ – проекции на координатные оси действующих в пределах i -того отсека сдвигающих сил;

$M_i^{c\partial}$ – то же, сдвигающих опрокидывающих моментов;

k_x^y, k_y^y и k_m^y – коэффициенты устойчиво-

сти, соответствующие предельному состоянию откоса.

Для окончательного решения задачи следует выбрать из трех коэффициентов устойчивости такой, который имеет наименьшее значение.

В практике также очень часто приходится сталкиваться с задачей определения коэффициента устойчивости в такой постановке:

1. Известна область грунтового основания, в которой возможно возникновение оползня с размерами L (длина) и H (высота).

2. Известны свойства слагающих основание грунтовых слоев.

3. Известен вид функции, описывающей поверхность скольжения

Требуется определить:

1. Координаты начала кривой скольжения или x_0 и y_0 .

2. Координаты конечной точки кривой скольжения x_n и y_n .

3. Коэффициенты, входящие в уравнение кривой скольжения $Y(x)$.

4. Перечисленные параметры должны соответствовать минимальным значениям коэффициентов устойчивости k_x, k_y и k_m .

Поскольку область основания, в пределах которой определяется устойчивость откоса (склона) имеет конечные размеры, мы в данном случае имеем дело с нахождением локального экстремума [9].

С использованием методов теории оптимизации задача определения коэффициентов устойчивости может быть сформулирована так:

$$\left. \begin{aligned}
k_{x,x}^y &= \sum_{i=1}^n T_{i,x}^{y\partial} / \sum_{i=1}^n T_{i,x}^{c\partial} \rightarrow \min_{x_0, y_0, Y_x(x), \gamma, c, \varphi} ; \\
k_{y,x}^y &= \sum_{i=1}^n T_{i,y}^{y\partial} / \sum_{i=1}^n T_{i,y}^{c\partial} \rightarrow \min_{x_0, y_0, Y_x(x), \gamma, c, \varphi} ; \\
k_{M,x}^y &= \sum_{i=1}^n M_i^{y\partial} / \sum_{i=1}^n M_i^{c\partial} \rightarrow \min_{x_0, y_0, Y_x(x), \gamma, c, \varphi} ; \\
k_{x,y}^y &= \sum_{i=1}^n T_{i,x}^{y\partial} / \sum_{i=1}^n T_{i,x}^{c\partial} \rightarrow \min_{x_0, y_0, Y_y(x), \gamma, c, \varphi} ; \\
k_{y,y}^y &= \sum_{i=1}^n T_{i,y}^{y\partial} / \sum_{i=1}^n T_{i,y}^{c\partial} \rightarrow \min_{x_0, y_0, Y_y(x), \gamma, c, \varphi} ; \\
k_{M,y}^y &= \sum_{i=1}^n M_i^{y\partial} / \sum_{i=1}^n M_i^{c\partial} \rightarrow \min_{x_0, y_0, Y_y(x), \gamma, c, \varphi} ; \\
k_{x,M}^y &= \sum_{i=1}^n T_{i,x}^{y\partial} / \sum_{i=1}^n T_{i,x}^{c\partial} \rightarrow \min_{x_0, y_0, Y_M(x), \gamma, c, \varphi} ; \\
k_{y,M}^y &= \sum_{i=1}^n T_{i,y}^{y\partial} / \sum_{i=1}^n T_{i,y}^{c\partial} \rightarrow \min_{x_0, y_0, Y_M(x), \gamma, c, \varphi} ; \\
k_{M,M}^y &= \sum_{i=1}^n M_i^{y\partial} / \sum_{i=1}^n M_i^{c\partial} \rightarrow \min_{x_0, y_0, Y_M(x), \gamma, c, \varphi} ;
\end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где $k_{x,x}^y$ – коэффициент устойчивости откоса (склона), установленный в ходе нахождения минимума функционала, численно равного отношению

суммы проекций на координатную ось OX удерживающих сил $\sum_{i=1}^n T_{i,x}^{y\partial}$ к сумме сдвигающих сил

$\sum_{i=1}^n T_{i,x}^{c\partial}$ за счет варьирования параметров поверхности скольжения $Y_x(x)$;

ности скольжения $Y_x(x)$;

$k_{y,x}^y$ – то же, для суммы проекций на координатную ось OY ; то же, $k_{M,x}^y$ для суммы опрокидывающих моментов;

$k_{x,y}^y$ – коэффициент устойчивости откоса (склона), установленный в ходе нахождения минимума функционала, численно равного отношению

суммы проекций на координатную ось OX удерживающих сил $\sum_{i=1}^n T_{i,x}^{y\partial}$ к сумме сдвигающих сил

$\sum_{i=1}^n T_{i,x}^{c\partial}$ за счет варьирования параметров поверхности скольжения $Y_y(x)$;

ности скольжения $Y_y(x)$;

ности скольжения $Y_y(x)$;

$k_{y,y}^y$ – то же, для суммы проекций на координатную ось OY ; то же, $k_{M,y}^y$ для суммы опрокидывающих моментов;

$k_{x,M}^y$ – коэффициент устойчивости откоса (склона), установленный в ходе нахождения минимума функционала, численно равного отношению

суммы проекций на координатную ось OX удерживающих сил $\sum_{i=1}^n T_{i,x}^{y\partial}$ к сумме сдвигающих сил

$\sum_{i=1}^n T_{i,x}^{c\partial}$ за счет варьирования параметров поверхности скольжения $Y_M(x)$;

ности скольжения $Y_M(x)$;

$\sum_{i=1}^n T_{i,x}^{cd}$ за счет варьирования параметров поверх-

ности скольжения $Y_M(x)$;

$k_{y,M}^y$ – то же, для суммы проекций на координатную ось ОУ;

$k_{M,M}^y$ – то же, для суммы опрокидывающих моментов.

Также должны выполняться такие ограничения:

1. Необходимо учитывать, что в зависимости от направления сдвигающие силы могут трансформироваться в удерживающие:

$$\left. \begin{aligned} \text{при } \frac{dY}{dx} \geq 0 \quad T_{y\partial} = T_{y\partial} \text{ и } T_{cd} = T_{cd}; \\ \text{при } \frac{dY}{dx} < 0 \quad T_{y\partial} = T_{y\partial} + T_{cd} \text{ и } T_{cd} = 0 \end{aligned} \right\}. \quad (3)$$

2. Если рассматриваемая точка находится выше уровня подземных вод, то в пределах i – того отсека следует принимать:

$$\left. \begin{aligned} T_{cd,i} &= f_1(\gamma, c, \varphi, q); \\ T_{y\partial,i} &= f_2(\gamma, c, \varphi, q); \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

3. Если рассматриваемая точка находится выше уровня подземных вод, то в пределах i – того отсека следует принимать:

$$\left. \begin{aligned} T_{cd,i} &= f_1(\gamma_{sat}, c_{sat}, \varphi_{sat, \max}, q); \\ T_{y\partial,i} &= f_2(\gamma_{sw}, c_{sat}, \varphi_{sat}, q); \end{aligned} \right\}. \quad (5)$$

где « sat » – состояние, соответствующее полному водонасыщению грунта;

« sw » – то же, полному взвешиванию в воде;

$T_{cd,i}$ – действующие в пределах i -того отсека сдвигающие силы;

$T_{y\partial,i}$ – действующие в пределах i -того отсека удерживающие силы.

Таким образом, в данном случае мы имеем три, в общем случае различные, поверхности скольжения и девять коэффициентов устойчивости. При этом наиболее опасной является такая поверхность устойчивости, которая соответствует наименьшему из девяти полученных в ходе расчетов значению коэффициентов устойчивости.

Литература

1. Механика грунтов, основания и фундаменты: [учебник] / С. Б. Ухов, В. В. Семенов, В. В. Знаменский, З. Г. Тер-Мартirosян, С. Н. Чернышев. – М.: Высш. Шк., 2002. – 566 с.
2. Механика грунтов, основания и фундаменты / Е. И. Медков, В. Г. Березанцев, М. Н. Гольдштейн, А. А. Царьков. – М.: Транспорт, 1970. – 287 с.
3. Дорфман А. Г. Вариационный метод исследования устойчивости откосов / А. Г. Дорфман // Вопросы геотехники. Проблемы механики земляного полотна железных дорог: труды ДИИЖТ. – М.: Издательство "Транспорт", 1965. – № 9. – С. 17–25.
4. Гольдштейн М. Н. Вариационный метод решения задач об устойчивости грунтов / М. Н. Гольдштейн // Вопросы геотехники: тр. ДИИТ. – Киев, 1969. – № 16.
5. Гинзбург Л. К. Противооползневые сооружения / Л. К. Гинзбург. – Днепропетровск: Лира ЛТД, 2007. – 188 с.
6. Причина К.С. Удосконалення методу розрахунку ґрунтових схилів в умовах міської забудови при змінному рівні підземних вод. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. Дніпропетровськ, 2016 – 21 с.
7. Кононюк А. Е. Основы теории оптимизации. Безусловная оптимизация / А. Е. Кононюк. – Киев: "Освіта України", 2011. – 544 с.
8. Почтман Ю. М. Методы математической оптимизации в механике грунтов / Ю. М. Почтман, А. Л. Колесниченко // Киев-Донецк: издат. объедин. «Вища школа», главное изд-во, 1977. – 104 с.
9. Корн Г. и Корн Т. Справочник по математике. – М.: Наука, 1974. – 840 с.