

## МЕХАНІКА ҐРУНТІВ ТА ФУНДАМЕНТИ

УДК 624.131.7

В. С. Андреев<sup>1</sup>  
И. И. Мосичева<sup>2</sup>  
В. Г. Шаповал<sup>3</sup>

РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА УСТОЙЧИВОСТИ  
ГРУНТОВЫХ ОТКОСОВ И СКЛОНОВ ДЛЯ СЛУЧАЯ,  
КОГДА ПОВЕРХНОСТЬ СКОЛЬЖЕНИЯ ИЗВЕСТНА  
ЗАРАНЕЕ

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна<sup>1</sup>  
Одесская государственная академия строительства и архитектуры<sup>2</sup>  
ГВУЗ «Национальный горный университет»<sup>3</sup>

*В статье рассмотрен новый подход к определению устойчивости откосов и склонов и его преимущества по сравнению с существующими в настоящее время методами расчета. Изложен алгоритм расчета устойчивости грунтовых склонов с использованием теории оптимизации при учете всех уравнений статики.*

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

### Введение

Существующие в настоящее время методы определения коэффициента устойчивости грунтовых откосов и склонов условно можно разбить на две большие 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].

Ко второй группе также относят вариационные методы [3, 4].

Поскольку методы, использующие элементы механики сплошной среды не позволяют выполнять расчеты при коэффициенте устойчивости  $K_y$ , меньшем единицы, они имеют ограниченную область применения (например, с помощью этих методов невозможно выполнить расчет противооползневых сооружений при  $K_y < 1$ ), в настоящей работе они не будут рассмотрены.

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

В настоящее время 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), который определяется как отношение суммы удерживающих усилий (т.е. сил или моментов) к сумме сдвигающих.

При этом обычно 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).

### Постановка задачи

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

В этой связи представляют интерес исследования, выполненные автором работы [6] применительно к степенной поверхности скольжения, 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 произвольной поверхности скольжения.

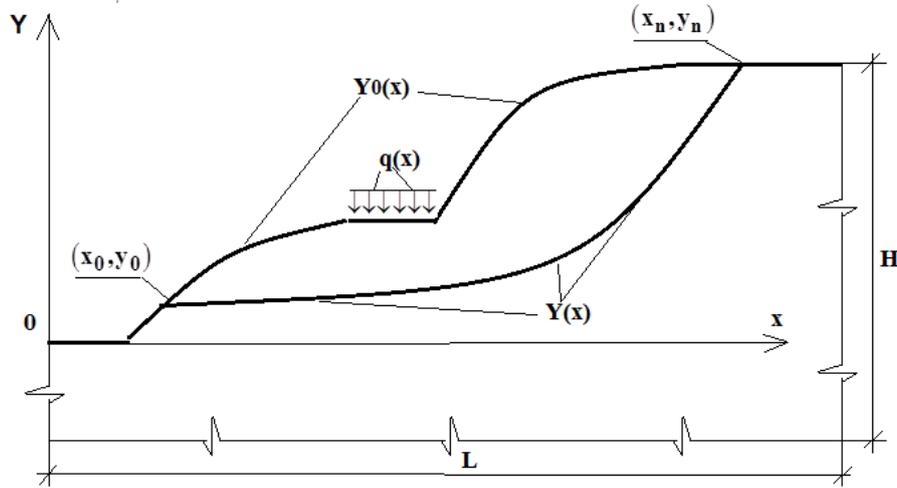


Рисунок 1 – К расчету устойчивости склона

### Предлагаемый алгоритм расчёта

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

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:

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

откуда

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

Здесь  $\sum X$  и  $\sum Y$  – проекции действующих по подошве сползающего грунтового массива на координатные оси  $OX$  и  $OY$ , соответственно, а  $\sum M$  – сумма действующих на массив опрокидывающих моментов;  $T_{i,x}^{y\partial}$  – проекция действующей в пределах  $i$ -того отсека по его подошве удерживающей силы на координатную ось  $OX$ ;  $T_{i,y}^{y\partial}$  – проекция действующей в пределах

$i$ -того отсека по его подошве удерживающей силы на координатную ось  $OY$ ;  $M_i^{y\partial}$  – момент удерживающих сил в пределах  $i$ -того отсека относительно некоторого общего для всех отсеков центра вращения;  $T_{i,x}^{c\partial}$  – проекция действующей в пределах  $i$ -того отсека по его подошве сдвигающей силы на координатную ось  $OX$ ;  $T_{i,y}^{c\partial}$  – проекция действующей в пределах  $i$ -того отсека по его подошве сдвигающей силы на координатную ось  $OY$ ;  $M_i^{c\partial}$  – момент сдвигающих сил, действующих в пределах  $i$ -того отсека, относительно некоторого общего для всех отсеков центра вращения;  $k_x^y$  – коэффициент устойчивости, соответствующий предельному состоянию откоса, которое достигается при равенстве сумм проекций сдвигающих сил  $T_{i,x}^{c\partial}$  и удерживающих сил  $T_{i,x}^{y\partial}$  на координатную ось  $OX$ ;  $k_y^y$  – коэффициент устойчивости, соответствующий предельному состоянию откоса, которое достигается при равенстве сумм проекций сдвигающих сил  $T_{i,y}^{c\partial}$  и удерживающих сил  $T_{i,y}^{y\partial}$  на координатную ось  $OY$ ;  $k_M^y$  – коэффициент устойчивости, соответствующий предельному состоянию откоса, которое достигается при равенстве сумм опрокидывающих моментов  $M_i^{c\partial}$  и удерживающих моментов  $M_i^{y\partial}$ , которые следует отсчитывать относительно некоторого общего центра вращения.

Для определения проекций сдвигающих и удерживающих сил на координатные оси и для определения сдвигающих и удерживающих моментов следует использовать расчетную схему, представленную на рисунке 2.

Согласно [1, 2, 3] значения действующих по подошве  $i$ -того грунтового отсека сдвигающих и удерживающих сил равны:

$$\left. \begin{aligned} T_i^{c\partial} &= (P_{gi} + P_{qi}) \cdot \sin(\alpha_i); \\ T_i^{y\partial} &= N_i \cdot \operatorname{tg}(\varphi_i) + c_i \cdot l_i; \\ N_i &= (P_{gi} + P_{qi}) \cdot \cos(\alpha_i). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Здесь  $T_i^{c\partial}$  – действующая параллельно подошве  $i$ -того отсека сдвигающая сила;  $T_i^{y\partial}$  – то же, удерживающая;  $P_{gi}$  – приложенная к верхней границе  $i$ -того отсека внешняя нагрузка;  $P_{qi}$  – вес  $i$ -того отсека;  $N_i$  – нормальная (к подошве  $i$ -того отсека) составляющая силы  $(P_{gi} + P_{qi})$ .

С учетом (2) проекции сдвигающей и удерживающей сил на ось  $OX$  равны:

$$\left. \begin{aligned} T_{i,x}^{c\partial} &= (P_{gi} + P_{qi}) \cdot \sin(\alpha_i) \cdot \cos(\alpha_i); \\ T_{i,x}^{y\partial} &= \left[ \begin{array}{l} (P_{gi} + P_{qi}) \cdot \operatorname{tg}(\varphi_i) + \\ + c_i \cdot l_i \end{array} \right] \cdot \cos(\alpha_i); \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

а проекции сдвигающей и удерживающей сил на ось  $OY$  равны:

$$\left. \begin{aligned} T_{i,y}^{c\partial} &= (P_{gi} + P_{qi}) \cdot \sin^2(\alpha_i); \\ T_{i,y}^{y\partial} &= \left[ \begin{array}{l} (P_{gi} + P_{qi}) \cdot \operatorname{tg}(\varphi_i) + \\ + c_i \cdot l_i \end{array} \right] \cdot \sin(\alpha_i). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

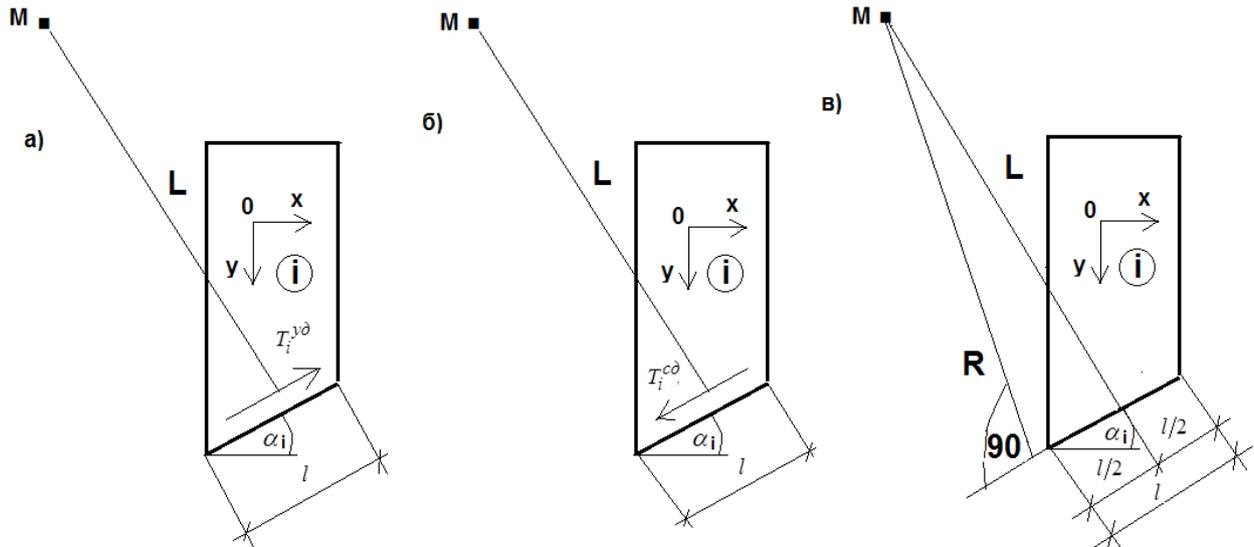


Рисунок 2 – К определению усилий, действующих на элементарный отсек сползающего грунтового массива:

а) – удерживающих сил; б) – сдвигающих сил; в) – опрокидывающих моментов.

На рисунке приняты такие обозначения:  $i$  – номер отсека;  $M$  – центр вращения;  $L$  – расстояние от центра вращения до центра подошвы отсека;  $R$  – нормаль к линии действия параллельных подошве  $i$  – того грунтового отсека сил (радиус вращения);  $l$  – длина подошвы отсека;  $\alpha_i$  – угол наклона  $i$ -того грунтового отсека к горизонту

Кроме того, с учетом (2) и представленной на рис. 2. схемы, опрокидывающий и удерживающий  $i$ -тый грунтовой отсек моменты равны:

$$\left. \begin{aligned} M_i^{c\partial} &= R_i \cdot (P_{gi} + P_{qi}) \cdot \sin(\alpha_i); \\ M_i^{y\partial} &= R_i \cdot \left[ \begin{aligned} &(P_{gi} + P_{qi}) \cdot \operatorname{tg}(\varphi_i) + \\ &+ c_i \cdot l_i \end{aligned} \right] \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где  $R_i$  – кратчайшее расстояние от центра вращения до линии действия сдвигающей и удерживающей сил (в пределах  $i$ -того грунтового отсека линии действия этих сил совпадают)

Для окончательного решения задачи следует выбрать из трех коэффициентов устойчивости  $k_x^y$ ,  $k_y^y$  и  $k_M^y$  тот, который имеет наименьшее значение.

При определении коэффициента устойчивости также должны учитываться такие ограничения:

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

$$\left. \begin{aligned} \text{при } \frac{dY}{dx} \geq 0 & \left\{ \begin{aligned} &T_{y\partial} = T_{y\partial}; \\ &u \\ &T_{c\partial} = T_{c\partial}; \end{aligned} \right. \\ \text{при } \frac{dY}{dx} < 0 & \left\{ \begin{aligned} &T_{y\partial} = T_{y\partial} + T_{c\partial}; \\ &u \\ &T_{c\partial} = 0. \end{aligned} \right. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

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

$$\left. \begin{aligned} T_{cd,i} &= f_1(\gamma, c, \varphi, q); \\ T_{y\partial,i} &= f_2(\gamma, c, \varphi, q); \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

3. Если рассматриваемая точка находится ниже уровня подземных вод, то в пределах  $i$ -того отсека следует принимать:

$$\left. \begin{aligned} T_{cd,i} &= f_1(\gamma_{sat}, c_{sat}, \varphi_{sat, \max}, q); \\ T_{y\partial,i} &= f_2(\gamma_{sw}, c_{sat}, \varphi_{sat}, q); \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

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.

### Выводы

- Предлагаемый нами подход к определению устойчивости откосов и склонов в отличие от существующих в настоящее время методов расчета позволяет проверить выполнение не одного [1, 2, 3], а всех уравнений равновесия (в условиях плоской задачи их число равно трем).
- При использовании предлагаемого нами подхода к определению устойчивости откосов и склонов в общем случае следует рассматривать не одну поверхность скольжения, так как это принято в [1, 2, 3], а несколько (в условиях плоской задачи их число равно трем, а в случае пространственной задачи – шести).
- При использовании изложенного в настоящей статье подхода к определению устойчивости откосов и склонов следует из трех (в случае, когда рассматривается плоская задача) или шести (в случае, когда рассматривается пространственная задача) значений коэффициентов устойчивости выбрать наименьшее число.
- В целом был сделан вывод о том, что предложенный в настоящей работе алгоритм определения устойчивости откосов и склонов позволяет более точно, чем принятые в настоящее время методы, определять минимальное значение их коэффициента устойчивости.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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.

**Андреев Владимир Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Пути и путевого хозяйства Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна.

**Мосичева Ирина Ивановна** – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры Оснований и фундаментов Одесской государственной академии строительства и архитектуры.

*Шаповал Владимир Григорьевич* – доктор технічних наук, професор, професор кафедри Стrojительства и геомеханики ГВУЗ «Национальный горный университет».

**В. С. Андрєєв**<sup>1</sup>  
**І. І. Мосічева**<sup>2</sup>  
**В. Г. Шаповал**<sup>3</sup>

## РОЗРАХУНОК КОЕФІЦІЕНТУ СТІЙКОСТІ ҐРУНТОВИХ УКОСІВ І СХИЛІВ ДЛЯ ВИПАДКУ, КОЛИ ПОВЕРХНЯ КОВЗАННЯ ВІДОМА ЗАЗДАЛЕГІДЬ

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна<sup>1</sup>  
Одеська державна академія будівництва та архітектури<sup>2</sup>  
ДВНЗ «Національний гірничий університет»<sup>3</sup>

*У статті розглянуто новий підхід до визначення стійкості укосів і схилів і його переваги в порівнянні з існуючими в даний час методами розрахунку. Викладено алгоритм розрахунку стійкості ґрунтових схилів з використанням теорії оптимізації при обліку всіх рівнянь статки.*

*Ключові слова:* коефіцієнт стійкості, укіс (схил), рівняння статки.

*Андрєєв Володимир Сергійович* – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Колій та колійного господарства Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

*Мосічева Ірина Іванівна* – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри Основ і фундаментів Одеської державної академії будівництва та архітектури.

*Шаповал Володимир Григорович* – доктор технічних наук, професор, професор кафедри Будівництва та геомеханіки ДВНЗ «Національний гірничий університет».

**V. Andreyev**<sup>1</sup>  
**I. Mosicheva**<sup>2</sup>  
**V. Shapoval**<sup>3</sup>

## CALCULATION OF THE COEFFICIENT OF THE STABILITY OF GROUND HANDS AND SLOPES FOR THE CASE WHEN THE SLIDING SURFACE IS KNOWN IN ADVANCE

Dnipropetrovsk National University of Railway Transport the name of Academician V. Lazaryan<sup>1</sup>  
Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture<sup>2</sup>  
The State Higher Educational Institution "National Mining University"<sup>3</sup>

*The article considers a new approach to determining the stability of ground hands and slopes and its advantages in comparison with existing methods of calculation. An algorithm for calculating the stability of ground slopes with the use of the optimization theory with account of all equations of statics is presented.*

*Key words:* coefficient of stability, slope (ground hands), equation of statics.

*Andreev Vladimir* – Dr. Ph., docent, docent of the Department of Ways and Track Facilities of the Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan.

*Mosicheva Irina* – Dr. Ph., Senior Lecturer of the Department of Bases and Foundations of the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architectur.

*Shapoval Vladimir* – Dr. Prof., Professor of the Department of Construction and Geomechanics of the State Higher Educational Institution "National Mining University".