



Караулов Александр Михайлович после окончания НИИЖТа в 1975 г. работает на кафедре «Геология, основания и фундаменты». В 1982 г. защитил кандидатскую диссертацию. В течение многих лет работал в научно-исследовательской группе при кафедре. Область научной деятельности — прикладные задачи теории устойчивости и упругопластического деформирования грунтовых массивов. С 1992 г. работает доцентом кафедры, а с 2005 г. — заведующим кафедрой. Опубликовал более 90 научных трудов.

УДК 624.131

А.М. КАРАУЛОВ

ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ И СКЛОНОВ С ПОМОЩЬЮ СИМПЛЕКС-МЕТОДА

В статье приводится методика оценки устойчивости откосов и склонов на основе результатов определения экстремальной системы сил взаимодействия в рамках расчетной схемы метода отсеков. Экстремальная система сил определяется симплекс-методом. Приводится методика построения диаграмм устойчивости первого и второго типа, которые позволяют надежно установить степень устойчивости грунтового массива.

Анализ проблемы оценки устойчивости откосов и склонов показал, что решение этой задачи может быть осуществлено в рамках расчетной схемы метода отсеков в том случае, если достаточно надежно определены очертание линии скольжения и система сил взаимодействия отсеков с окружающим грунтом [1]. Первый вопрос — об очертании линии скольжения — решается методами вариационного исчисления. Методика этого решения подробно изложена, например, в работах [2, 3]. Второй вопрос — определение системы сил взаимодействия отсеков — успешно решается методами линейного программирования [4, 5]. Совместное решение этих двух вопросов является перспективной, но еще не решенной задачей.

В данной статье приводятся различные варианты оценки устойчивости откосов и склонов при решении этой задачи симплекс-методом, поскольку результаты такого решения существенно отличаются от традиционного расчета коэффициента устойчивости.

Кратко опишем основные положения расчета устойчивости откосов и склонов с помощью симплекс-метода. Рассматриваются расчетные схемы для условий плоской деформации в декартовой системе координат xOy . Выделим часть склона произвольной линией в виде ломаной прямой ADB (рис. 1). К контуру склона ACB может быть приложена произвольная нагрузка, и в области обрушения $ACBD$ могут действовать произвольные массовые силы. Силы и моменты сил, действующие на отдельный отсек, показаны на рис. 1 (для индекса i). Для удобства записи выражений равнодействующие силы, приложенные к боковым граням отсека, приведены к подошве отсека, а равнодействующие внешних нагрузок и массовых сил и равнодействующие силы, приложенные к подошве отсека, приведены к крайней правой точке подошвы отсека. Геометрические параметры отсека — высота h_i вертикальных граней, ширина b_i и длина l_i подошвы, угол ее наклона к горизонтали α_i — также обозначены на рис. 1.

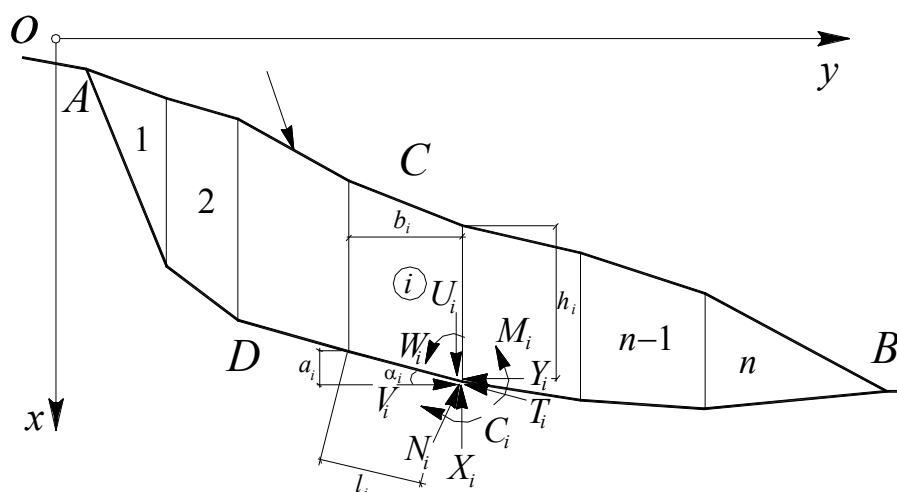


Рис. 1. Расчетная схема к оценке устойчивости откоса

Цель решения заключается в определении наиболее невыгодной в отношении устойчивости склона системы сил взаимодействия отсеков с окружающим грунтом. Запишем ограничения-равенства и ограничения-неравенства, которые необходимо выполнить в отношении системы сил для отсеков $i = 1, \dots, n$:

$$\begin{aligned} 0 &= X_{i-1} + N_i \cos \alpha_i + T_i \sin \alpha_i + X_i - U_i; \\ 0 &= Y_{i-1} + N_i \sin \alpha_i - T_i \cos \alpha_i - Y_i + V_i; \\ 0 &= X_{i-1} b_i + Y_{i-1} a_i + M_{i-1} + C_i - M_i - W_i; \\ \eta_{1i} &= N_i \operatorname{tg} \varphi_i + c_i l_i - T_i \geq 0; \\ \eta_{2i} &= Y_i \operatorname{tg} \varphi_i^* + c_i^* h_i - X_i \geq 0; \\ \eta_{3i} &= Y_i \operatorname{tg} \varphi_i^* + c_i^* h_i + X_i \geq 0; \\ \eta_{4i} &= N_i l_i - C_i \geq 0; \\ \eta_{5i} &= Y_i h_i - M_i \geq 0. \end{aligned} \quad (1)$$

В уравнениях (1) при $i = 1$: $X_{i-1} = Y_{i-1} = M_{i-1} = 0$ и при $i = n$: $X_n = Y_n = M_n = 0$. Первые три выражения являются уравнениями статического равновесия. Четвертое выражение есть условие прочности грунта по подошве, а пятое и шестое — условие прочности грунта по боковой грани отсека. Седьмое выражение ограничивает размерами отсека положение силы давления по подошве, а восьмое — положение силы давления по боковой грани. Выражения (1), записанные для всех отсеков, представляют систему линейных ограничений-равенств и ограничений-неравенств для искомой системы сил и моментов.

Поскольку речь идет о процессе обрушения, то следует оценить возможность формирования вдоль линии ADB предельных сдвигающих сил, направленных в сторону ожидаемого смещения грунтового массива. Поэтому определим функцию цели как сумму разностей между касательными силами, действующими по подошве отсеков, и их предельными значениями:

$$\Phi = \sum_{i=1}^n (T_i - N_i \operatorname{tg} \varphi_i - c_i l_i). \quad (2)$$

Максимальному приближению выделенной части склона к предельному состоянию будет отвечать максимум функции цели Φ . Поиск максимума

функции цели Φ осуществляется симплекс-методом [4]. В результате решения определяется полная система сил взаимодействия между отсеками.

Для практического использования результаты решения могут быть представлены в нескольких вариантах, частично рассмотренных в работе [5].

Во-первых, располагая системой сил, можно вычислить коэффициент устойчивости по традиционной формуле

$$k_y = \frac{\sum_{i=1}^n (N_i \operatorname{tg} \varphi_i + c_i l_i)}{\sum_{i=1}^n T_i}. \quad (3)$$

Однако это не всегда возможно. Система ограничений-равенств и ограничений-неравенств может оказаться несовместной. Это означает, что выделенная линией ADB часть склона при заданной прочности грунтов не может находиться в состоянии статического равновесия. В таком случае констатируется факт недопустимого состояния склона. Числовое значение коэффициента устойчивости не может быть вычислено по формуле (3) ввиду отсутствия системы сил. Во-вторых, функция цели может быть равной нулю, что свидетельствует о возможности предельного состояния склона, которому отвечает значение $k_y = 1$. И, наконец, в-третьих, значениям $\Phi < 0$ отвечает безопасное состояние склона для анализируемой схемы обрушения. Здесь не существует взаимоуравновешенной системы сил, при которой вдоль всей линии ADB имеет место предельное состояние, т.е. линия ADB не может быть линией скольжения. Значения $k_y > 1$ в этом случае можно вычислить по формуле (3).

Далее были разработаны методики построения диаграмм устойчивости первого и второго типа. Диаграмма устойчивости первого типа (рис. 2, а) предназначена для анализа фиксированной схемы обрушения однородного по геологическому строению склона или, например, для оползневого склона, деформации которого вызваны смещением земляных масс по однородной прослойке слабого грунта. Для ее построения выполняется серия расчетов симплекс-методом при различных значениях параметров прочности $\varphi_i = \varphi$ и $c_i = c$ грунта вдоль предполагаемой линии скольжения. По результатам расчета на плоскости c, φ выделяются области недопустимого (система несовместна), предельного ($\Phi = 0$) и безопасного ($\Phi < 0$) состояний склона в зависимости от значения параметров прочности грунта.

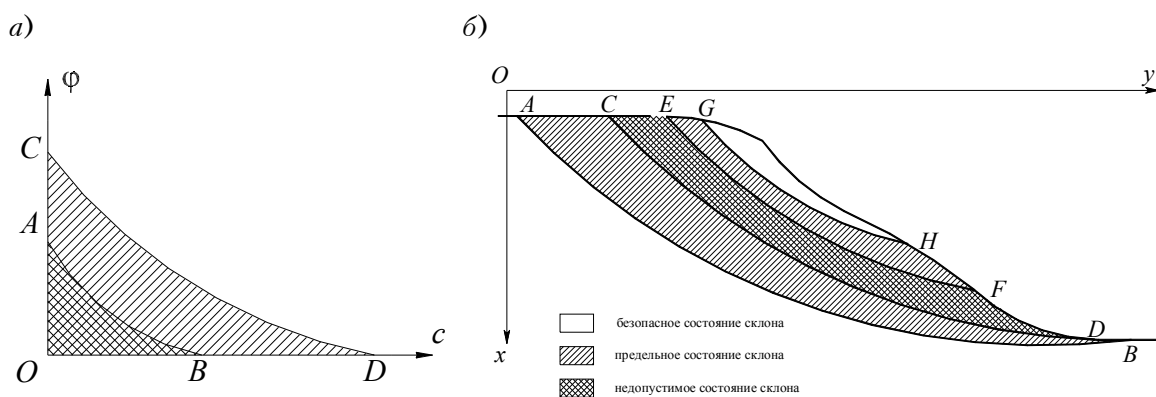


Рис. 2. Диаграмма устойчивости: а — первого типа, б — второго типа

Нижняя граница AB разделяет зоны недопустимого и предельного состояний, верхняя CD — зоны предельного и безопасного состояния. Диаграмма устойчивости первого типа дает полное и наглядное представление об устойчивости склона при различных значениях c и φ . Фактическим значениям параметров прочности отвечает соответствующая точка на диаграмме. Положение этой точки относительно границ AB и CD позволяет оценить устойчивость склона.

Диаграмма устойчивости второго типа (рис. 2, б) может быть построена как для однородного, так и неоднородного по геологическому строению склона. Для построения диаграммы необходимо задаться формой линии скольжения. Исследуя симплекс-методом выделенную произвольной линией заданной формы часть склона, можно найти наиболее невыгодную в отношении устойчивости систему сил взаимодействия и, соответственно, установить качественное состояние склона — недопустимое, предельное или безопасное. Выполняя подобные расчеты для различных предполагаемых линий скольжения, представляется возможным на геологическом разрезе склона выделить три области, являющихся геометрическим местом положения линий, которым отвечает одно из указанных состояний склона. Если на диаграмме второго типа присутствует область недопустимых состояний, то это означает невозможность существования склона в устойчивом состоянии вне зависимости от выбранной формы линии скольжения. Таким образом, диаграмма устойчивости второго типа определяет, хотя и в несовершенном виде, необходимое условие устойчивости склона, которое заключается в отсутствии области недопустимых состояний.

Коэффициент устойчивости может быть вычислен не только по формуле (3), но и как отношение фактических параметров прочности грунта к их критическим значениям. Для этого выполняется серия расчетов склона симплекс-методом при значениях характеристиках прочности грунта исследуемой линии скольжения c_i , φ_i , равных: $c_i = c_{i\phi}/k$, $\text{tg}\varphi_i = \text{tg}\varphi_{i\phi}/k$. При изменении значения параметра k устанавливаются его граничные значения, разделяющие области недопустимых и предельных состояний (обозначим эту границу $k = k_{\text{нп}}$), и области предельных и безопасных состояний (обозначим эту границу $k = k_{\text{пб}}$). Тогда коэффициент устойчивости склона k_y при данных характеристиках $c_{i\phi}$, $\varphi_{i\phi}$ вдоль линии скольжения можно определить в виде:

$$k_y = \frac{1}{k_{\text{нп}}} \text{ при } k_{\text{нп}} > 1; k_y = 1 \text{ при } k_{\text{нп}} < 1 < k_{\text{пб}}; k_y = \frac{1}{k_{\text{пб}}} \text{ при } k_{\text{пб}} > 1. \quad (4)$$

Графически эти зависимости можно представить следующим образом (рис. 3).

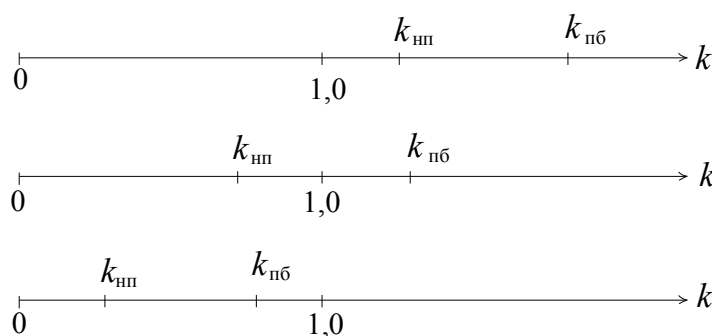


Рис. 3. К определению коэффициента устойчивости

Диаграмма устойчивости первого типа позволяет определить вероятность обрушения и вероятность устойчивого состояния склона для некоторой линии скольжения заданного очертания. После построения этой диаграммы устойчивости используется статистическая характеристика параметров прочности в виде интегральных кривых распределения вероятности F_c для удельного сцепления c и F_ϕ для тангенса угла внутреннего трения ϕ , соответствующих, например, нормальному закону распределения:

$$F_\phi = \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{(z-t_n)^2}{2\sigma_t^2}} dz; \quad F_c = \frac{1}{\sigma_c \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^c e^{-\frac{(z-c_n)^2}{2\sigma_c^2}} dz, \quad (5)$$

где t_n — среднее значение тангенса угла внутреннего трения ϕ ; c_n — среднее значение удельного сцепления c ; σ_t — среднеквадратическое отклонение тангенса угла внутреннего трения ϕ ; σ_c — среднеквадратическое отклонение удельного сцепления c .

На рис. 4 эти кривые совмещены с диаграммой устойчивости первого типа. Двигаясь вдоль границы AB , можно найти точку, которой соответствует максимальное значение произведения $p_{AB} = \max(p_1 p_2)$, и аналогично для границы CD найти значение $p_{CD} = \max(p_3 p_4)$. Величину p_{AB} рассматриваем как вероятность наступления недопустимого состояния, величина p_{CD} есть вероятность наступления недопустимого или предельного состояния. Соответственно величину $1 - p_{CD}$ можно рассматривать как вероятность безопасного состояния склона для принятой схемы обрушения.

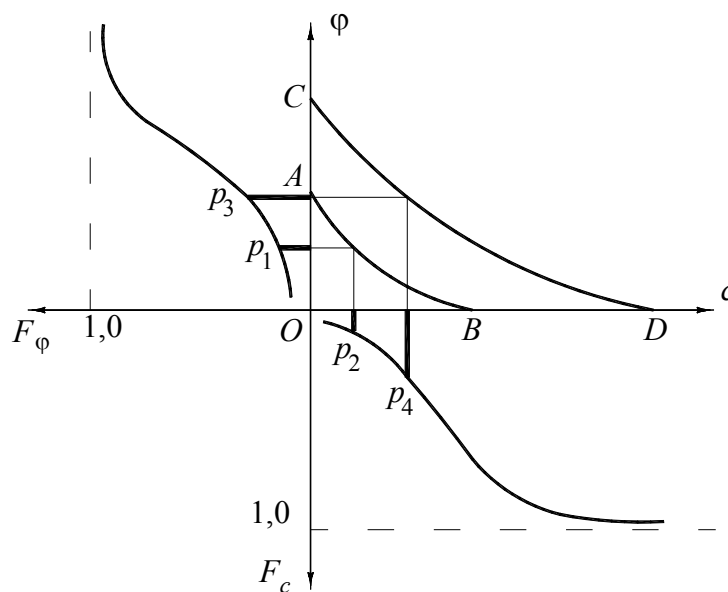


Рис. 4. К определению вероятности недопустимого и безопасного состояния склона

Предлагаемая методика доведена до стадии практического применения и может использоваться для вероятностной оценки устойчивости склонов.

Таким образом, оценка устойчивости откосов и склонов с помощью симплекс-метода может осуществляться в различных вариантах. В отличие от метода отсеков, в данном случае анализируются условия устойчивости для всего диапазона возможного изменения системы сил. Диапазон возможного изменения

системы сил, а также форма функции цели задаются в зависимости от характера конкретной задачи. В частности, рассматриваемый метод был успешно реализован для определения предельного давления на подпорные стенки [6]. Отказ от дополнительных гипотез в виде равенств при построении решения на основе расчетной схемы метода отсеков и в то же время точное соблюдение уравнений равновесия и условий прочности грунта для системы сил приводит к так называемым диапазонным расчетам. В этих расчетах, как правило, нет конкретного значения коэффициента устойчивости, но есть конкретный и точно определенный диапазон характеристик грунта или положения линий скольжения, при котором склон находится в одном из вышеуказанных состояний.

Литература

1. Костэ Ж., Сангlera Г. Механика грунтов. М.: Стройиздат, 1981. 456 с.
2. Соловьев Ю.И. Устойчивость откосов из гипотетического грунта // Тр. НИИЖТа. Вып. 28. Новосибирск, 1964. С. 83–97.
3. Федоровский В.Г., Курилло С.В. Метод переменной степени мобилизации сопротивления сдвигу для расчетов прочности грунтовых массивов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1998. № 5–6.
4. Зуховицкий С.И., Авдеева Л.И. Линейное и выпуклое программирование. М., 1964. 230 с.
5. Караулов А.М. Постановка и решение задачи устойчивости откосов и склонов как задачи линейного программирования // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2005. № 3. С. 2–6.
6. Караулов А.М., Кан Тхэ Сан. Постановка и решение задачи о предельном давлении грунта на подпорную стенку как задачи линейного программирования // Изв. вузов. Строительство. № 1. Новосибирск, 2005. С. 101–106.