

## ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ НОМОГРАММЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ

Проектирование и строительство дорог, осушительных каналов, земляных дамб и других инженерных сооружений связаны с определением устойчивости откосов.

Существующие методы определения устойчивости откосов являются довольно громоздкими, требуют больших затрат времени, сложных графических построений и многочисленных вычислений. С целью упрощения практического метода расчета коэффициента устойчивости откосов нами разработаны номограммы. При этом в основу составления номограмм приняты теоретические положения об устойчивости откосов, выведенные профессорами В. В. Соколовским, В. Г. Березанцевым и др.

Суть их сводится к тому, что:

а) предельное напряженное состояние характеризуется уравнением

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi. \quad (1)$$

где  $\tau$  — касательное напряжение;

$c$  — удельная сила сцепления;

$\sigma$  — нормальное напряжение;

$\varphi$  — угол внутреннего трения;

б) сдвиг происходит по круглоцилиндрической поверхности скольжения.

В качестве дополнительных условий при составлении номограмм принято, что:

а) основание имеет угол внутреннего трения  $\varphi$  не ниже, чем грунт рассматриваемого откоса;

б) хорда, стягивающая кривую скольжения, расположена по отношению к откосу (рис. 1) под углом  $\psi$ , который определяется из выражения

$$\psi = \alpha - \varphi - \varepsilon, \quad (2)$$

где  $\alpha$  — угол наклона;

$\varphi$  — угол внутреннего трения;

$\varepsilon$  — угол, определяемый по формуле

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \left( \alpha - \frac{\pi}{2} - \varphi + \operatorname{arc} \sin \frac{\sin \alpha}{\sin \varphi} \right). \quad (3)$$

Принимая эти условия, из  $\triangle OCD$  по теореме синусов определим длину хорды

$$a = \frac{H \sqrt{1 + m^2} \cdot \sin(\pi - \alpha)}{\sin(\alpha - \psi)}, \quad (4)$$

где  $H$  — высота насыпи;  
 $m$  — заложение откоса.

Длина кривой скольжения определится по формуле:

$$l = \frac{8b - a}{3}, \quad (5)$$

где  $b$  — хорда, соединяющая начало кривой скольжения и ее середину.

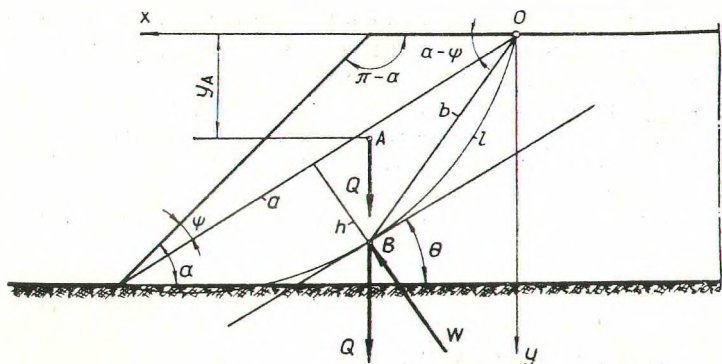


Рис. 1. Расчетная схема сечения склона для оценки коэффициента устойчивости откоса.

Зная длину кривой скольжения и очертание откоса, можно вычислить вес грунта призмы сомнительной устойчивости. Он равен

$$Q = \gamma \left[ \frac{h}{15} (8b + 6a) + \frac{1}{2} Ha \sqrt{1 + m^2} \cdot \sin \psi \right], \quad (6)$$

где  $\gamma$  — объемный вес грунта;  
 $h$  — высота сегмента.

Центр тяжести призмы грунта сомнительной устойчивости определится из выражения

$$y_A = \frac{H(3l - 2Hm)}{2(4l - 3Hm)}. \quad (7)$$

Используя приведенные выше формулы, были составлены номограммы (рис. 2 и 3).

В первом квадранте номограммы показана зависимость  $l = f(H, m, \varphi)$ . При ее построении использованы формулы (2) — (5).

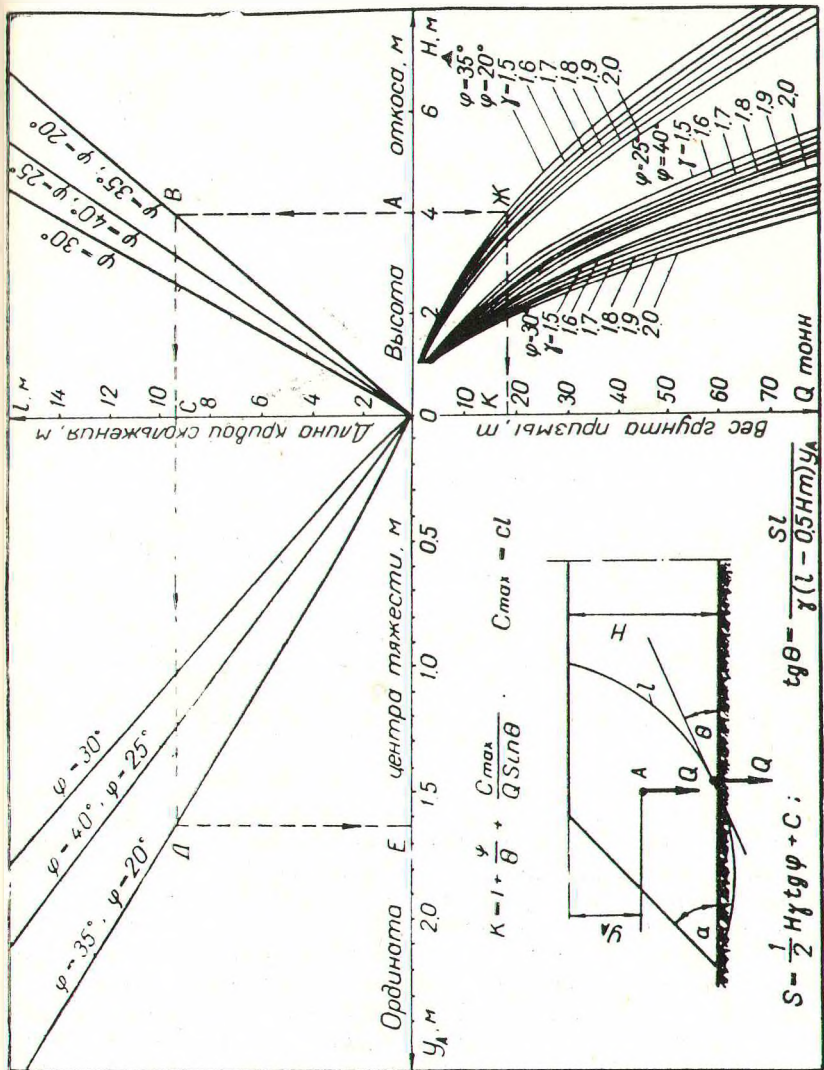


Рис. 2. Номограмма для определения коэффициента устойчивости откосов насыпи при  $m = 1,0$ .

Во втором квадранте приведена зависимость  $y_A = f(l, \varphi, m)$ .  
Найдены значения  $y_A$  по формуле (7).

В четвертом квадранте на основании формулы (6) построена зависимость  $Q = f(\varphi, H, \gamma)$ .

Определение коэффициента устойчивости откосов с помощью номограмм производится в следующем порядке.

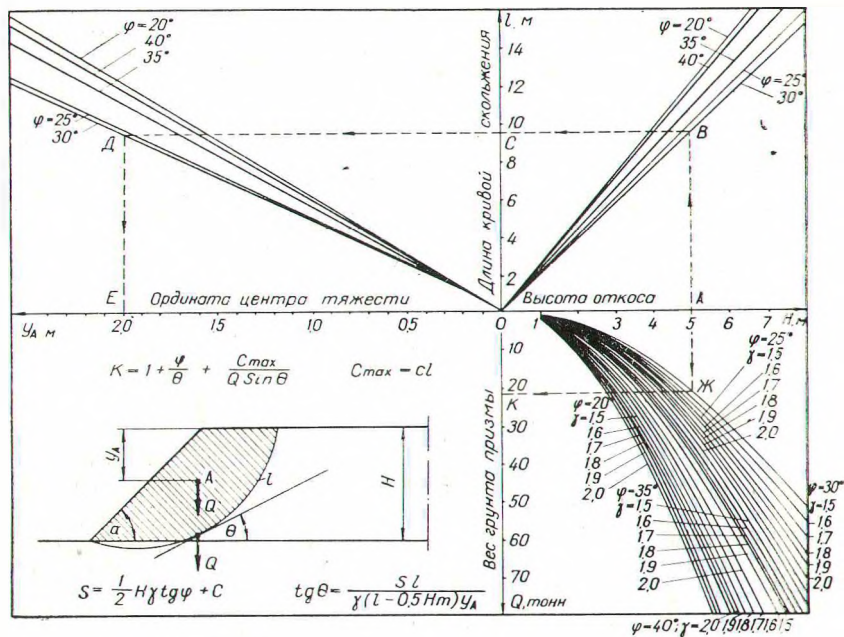


Рис. 3. Номограмма для определения коэффициентов устойчивости откосов насыпи при  $m = 1,5$ .

По данным компрессионных испытаний устанавливается угол внутреннего трения и коэффициент сцепления грунта. Затем переходят к определению других расчетных величин. По оси абсцисс откладывают высоту насыпи (например, на рис. 2 точка  $A$ ) и проводят вертикаль до пересечения с наклонной линией, соответствующей принятому расчетному углу внутреннего трения. Проекция точки пересечения  $B$  на ось ординат даст значение длины  $l$  кривой скольжения. Далее проводится горизонталь во второй квадрант до пересечения с линией  $\varphi$  (точка  $D$ ), проектируется ( $D$ ) на ось абсцисс и определяется ордината центра тяжести ( $E$ ). После этого необходимо возвращаться на ось абсцисс первого квадранта ( $A$ ) и путем ортогонального проектирования на оси ординат четвертого квадранта найти вес грунта призмы сомнительной устойчивости ( $k$ ).



При наличии всех исходных данных вычисления производятся по формулам:

сопротивление грунта сдвигу

$$S = \frac{H}{2} \gamma \operatorname{tg} \varphi + c; \quad (8)$$

полная сила сцепления грунта

$$c_{\max} = cl \quad (9)$$

угол наклона касательной, проводимой через точку приложения равнодействующей сдвигающей сил

$$\operatorname{tg} \Theta = \frac{Sl}{\gamma(l - 0,5Hm)g_A}; \quad (10)$$

коэффициент устойчивости откоса

$$k = 1 + \frac{\varphi}{\Theta} + \frac{c_{\max}}{Q \sin \Theta}. \quad (11)$$

Данный способ определения коэффициента устойчивости приемлем для сухих откосов, т. е. при глубоком залегании уровня грунтовых вод.

При близком залегании депрессионной поверхности помимо веса грунта и сил бокового давления на грунт действуют гидродинамические силы.

Гидродинамическое давление (давление фильтрационной воды) может быть учтено по-разному. Наиболее правильно будет заменить эти объемные силы поверхностными (по Н. М. Герсеванову), если вес призмы скользящего грунта вместе с водой в его порах уравновесить силами давления в скелете грунта (так называемые эффективные давления) и силами давления грунтовой воды, приложенными по контуру поверхности скольжения (так называемые нейтральные давления). Поэтому учет роли воды может быть сделан путем приложения к кривой скольжения сил гидродинамического давления, равных в каждой точке кривой  $\gamma h$ , где  $h$  — пьезометрическая высота, определяемая по сетке фильтрации и направленная нормально к кривой.

Величину  $h$  можно приближенно определять как глубину фильтрационной воды над кривой скольжения или как разность между высотой откоса и наивысшим залеганием грунтовых вод.

С учетом вышеизложенного коэффициент устойчивости откоса можно определить по следующей формуле:

$$k = 1 + \frac{\varphi}{\Theta} + \frac{cl - \gamma hl \operatorname{tg} \varphi}{Q \sin \Theta}; \quad (12)$$

где  $\gamma$  — объемный вес грунта, кг/см<sup>3</sup>;

$h$  — пьезометрическая высота, м;

$l, \varphi, \Theta, c, Q$  — то же, что и в формуле (1).

Для определения  $Q, l, g_A$  используются те же номограммы.

Таблица 1

Значения коэффициентов устойчивости откосов, вычисленных при помощи вспомогательных номограмм

Высота откоса, м	При отсутствии гидравлического напора				При наличии гидравлического напора							
	Угол внутреннего трения $\varphi=20^\circ$		Угол внутреннего трения $\varphi=25^\circ$		Угол внутреннего трения $\varphi=30^\circ$		Угол внутреннего трения $\varphi=25^\circ$		Угол внутреннего трения $\varphi=30^\circ$			
	Объемный вес $\gamma=1,6$ т/м <sup>3</sup>	Объемный вес $\gamma=1,9$ т/м <sup>3</sup>	Объемный вес $\gamma=1,6$ т/м <sup>3</sup>	Объемный вес $\gamma=1,9$ т/м <sup>3</sup>	Объемный вес $\gamma=1,6$ т/м <sup>3</sup>	Объемный вес $\gamma=1,9$ т/м <sup>3</sup>	Объемный вес $\gamma=1,6$ т/м <sup>3</sup>	Объемный вес $\gamma=1,9$ т/м <sup>3</sup>	Объемный вес $\gamma=1,6$ т/м <sup>3</sup>	Объемный вес $\gamma=1,9$ т/м <sup>3</sup>		
1	3,13	4,07	4,62	4,24	4,66	4,13	2,61	3,12	3,47	3,15	3,26	2,73
2	2,21	2,10	2,83	2,65	3,21	2,95	1,47	1,49	1,60	1,43	1,40	1,12
3	2,00	1,93	2,42	2,26	2,46	2,34	1,33	1,22	1,09	0,91	0,85	0,72
4	1,90	1,89	2,25	2,16	2,34	2,32	1,12	1,09	0,77	0,64	0,34	0,16
5	1,84	1,80	2,14	2,06	2,24	2,15	1,03	0,97	0,64	0,46	0,16	0,05
6	1,78	1,78	2,07	2,05	2,12	2,06	0,98	0,94	0,41	0,29	0,07	—
Заложение откоса $m=1$ , удельное сцепление $c=1500$ кг/м <sup>2</sup>												
1	3,56	3,22	3,10	2,84	2,85	2,64	2,95	2,49	2,47	2,20	2,19	1,98
2	2,64	2,46	2,29	2,18	2,18	2,08	1,77	1,56	1,51	1,37	1,41	1,29
3	2,38	2,26	2,05	1,98	1,98	1,92	1,30	1,15	1,19	1,10	1,15	1,08
4	2,18	2,10	1,94	1,89	1,90	1,86	1,01	0,89	1,02	0,95	1,01	0,96
5	2,13	2,05	1,88	1,84	1,88	1,85	0,78	0,66	0,91	0,85	0,90	0,81
Заложение откоса $m=1,5$ , удельное сцепление $c=1500$ кг/м <sup>2</sup>												

Примечание. В расчете коэффициента устойчивости при наличии гидравлического напора принято, что пьезометрическая высота на 20 см меньше высоты откоса.

Значения коэффициентов устойчивости откосов, вычисленных при помощи вспомогательных номограмм

Высота откоса, м	При отсутствии гидравлического напора						При наличии гидравлического напора					
	Угол внутреннего трения $\varphi=20^\circ$		Угол внутреннего трения $\varphi=25^\circ$		Угол внутреннего трения $\varphi=30^\circ$		Угол внутреннего трения $\varphi=20^\circ$		Угол внутреннего трения $\varphi=25^\circ$		Угол внутреннего трения $\varphi=30^\circ$	
	Объемный вес $\gamma=1,6$ т/м <sup>3</sup>	Объемный вес $\gamma=1,9$ т/м <sup>3</sup>	Объемный вес $\gamma=1,6$ т/м <sup>3</sup>	Объемный вес $\gamma=1,9$ т/м <sup>3</sup>	Объемный вес $\gamma=1,6$ т/м <sup>3</sup>	Объемный вес $\gamma=1,9$ т/м <sup>3</sup>	Объемный вес $\gamma=1,6$ т/м <sup>3</sup>	Объемный вес $\gamma=1,9$ т/м <sup>3</sup>	Объемный вес $\gamma=1,6$ т/м <sup>3</sup>	Объемный вес $\gamma=1,9$ т/м <sup>3</sup>	Объемный вес $\gamma=1,6$ т/м <sup>3</sup>	Объемный вес $\gamma=1,9$ т/м <sup>3</sup>
1	3,13	4,07	4,62	4,24	4,66	4,13	2,77	3,75	4,24	4,04	4,15	3,62
2	2,21	2,10	2,83	2,65	3,21	2,95	2,04	1,82	2,52	2,28	2,66	2,39
3	2,00	1,93	2,42	2,26	2,46	2,34	1,80	1,73	2,04	1,87	2,00	1,87
4	1,90	1,89	2,25	2,16	2,34	2,32	1,70	1,67	1,85	1,75	1,76	1,73
5	1,84	1,80	2,14	2,06	2,24	2,15	1,62	1,56	1,72	1,63	1,68	1,58
6	1,78	1,78	2,07	2,05	2,12	2,06	1,56	1,54	1,63	1,60	1,57	1,50

Заложение откоса  $m=1$ , удельное сцепление  $c=1500$  кг/м<sup>2</sup>

1	3,56	3,22	3,10	2,84	2,85	2,64	3,34	2,96	2,88	2,62	2,63	2,41
2	2,64	2,46	2,29	2,18	2,18	2,08	2,38	2,15	2,06	1,95	1,96	1,85
3	2,38	2,26	2,05	1,98	1,98	1,92	2,08	1,90	1,81	1,74	1,75	1,69
4	2,18	2,10	1,94	1,89	1,90	1,86	1,86	1,71	1,69	1,63	1,66	1,62
5	2,13	2,05	1,88	1,84	1,88	1,85	1,77	1,62	1,62	1,57	1,62	1,57

Заложение откоса  $m=1,5$ , удельное сцепление грунта  $c=1500$  кг/м<sup>2</sup>

1	3,56	3,22	3,10	2,84	2,85	2,64	3,34	2,96	2,88	2,62	2,63	2,41
2	2,64	2,46	2,29	2,18	2,18	2,08	2,38	2,15	2,06	1,95	1,96	1,85
3	2,38	2,26	2,05	1,98	1,98	1,92	2,08	1,90	1,81	1,74	1,75	1,69
4	2,18	2,10	1,94	1,89	1,90	1,86	1,86	1,71	1,69	1,63	1,66	1,62
5	2,13	2,05	1,88	1,84	1,88	1,85	1,77	1,62	1,62	1,57	1,62	1,57

Примечание. В расчете коэффициента устойчивости при наличии гидравлического напора принята пьезометрическая высота на  $\frac{1}{2}H$  (на 0,5 высоты откоса).

Результаты расчетов коэффициента устойчивости откосов при наличии гидравлического напора и без него приведены в таблицах 1 и 2.

Из таблиц 1 и 2 видно, что коэффициент устойчивости откосов значительно уменьшается при наличии гидравлического напора.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Березанцев В. Г. О расчете устойчивости песчаных откосов методами теории предельного равновесия, Труды НИИТС, вып. 18, Трансжелдориздат, М., 1956.
2. Соколовский В. В. Статика сыпучей среды. Государственное издательство технико-теоретической литературы, М., 1954.

*П. Г. ПЕШКОВ, Л. Л. АПОЛЛОНОВ*  
(Всесоюзный научно-исследовательский институт  
транспортного строительства, Москва)

### **К ВОПРОСУ О МЕСТНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ ВЫЕМОК В ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ**

К нарушениям местной устойчивости откосов земляных сооружений относят обычно деформации, возникающие и протекающие в поверхностных грунтовых слоях, подверженных сезонному воздействию погодно-климатических факторов. Под влиянием последних изменяются состояния и свойства грунта и прежде всего такие показатели, как плотность, влажность, структура, прочность и водопроницаемость. Среди большого числа взаимовлияющих процессов физико-химического выветривания изменение состояния и свойств связных грунтов в откосах в основном обуславливается периодическим промерзанием и оттаиванием, набуханием и усадкой, выносом, переносом и отложением воднорастворимых солей в грунте.

В практике для качественной и количественной оценки местной устойчивости откосов в зависимости от характерных особенностей грунта и условий его залегания, как правило, выделяют один из основных процессов выветривания и исследуют его влияние на прочность грунта. Для сезонно промерзающего слоя глинистых откосов образование сплывов и стекание разжиженного грунта к подошве относят обычно за счет резкого снижения прочности при оттаивании [10, 8, 6 и др.] М. Н. Гольдштейн [3] указывает на возможность образования гидростатического напора в оттаивающем откосе, но до настоящего времени отсутствует способ количественного учета влияния такого напора на устойчивость откоса.



Исследования, проведенные в ЦНИИСе, а также некоторые данные [7, 2], показали, что в зависимости от текстуры и льдонасыщенности мерзлого грунта при оттаивании его водопроницаемость резко увеличивается. Так, например, пылеватый суглинок с пределами пластичности  $W_p=18,9\%$ ,  $W_t=32,9\%$  в состоянии грунтовой массы был практически водопроницаем. После промораживания при влажности 25% в грунте образовалась мелкосетчатая ледяная текстура, которая обусловила увеличение его водопроницаемости в период оттаивания до 1,8 м/сутки. После второго и третьего циклов замораживания-оттаивания характер изменения водопроницаемости повторился.

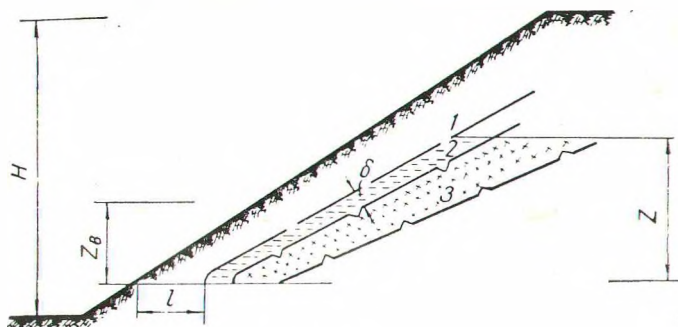


Рис. 1.

Полученные данные позволили установить, что глинистые грунты с коэффициентом фильтрации  $10^{-9}$ — $10^{-6}$  см/сек, имеющие при промерзании влажность большую, чем влажность на пределе льдовыделения, при оттаивании увеличивают коэффициент фильтрации на 2—4 порядка.

Известно [11], что при промерзании грунта в нем не образуются водоустойчивые агрегаты. Вода вытесняющих линз и кристаллов льда при гидратации поверхности минеральных частиц разрушает агрегаты и при полном водонасыщении приводит грунт в состояние грунтовой массы. При этом резко уменьшается водопроницаемость и способность к водоотдаче. Скорость уменьшения водопроницаемости зависит от водоустойчивости морозных агрегатов, срок установления ее до исходной величины колеблется от нескольких часов до нескольких десятков часов.

Приведенные предпосылки позволяют приблизительно определить условия образования гидростатического напора и оценить его величину. Очевидно, что напор может образоваться не по всей толщине талого слоя, а только в прослое повышенной водопроницаемости (рис. 1). При этом мощность талого прослоя для каждого положения границы протаивания определяется произ-