

невелик ($90^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$), что позволяет для определения безразмерных параметров по формуле (1) использовать график (рис. 3).

Л и т е р а т у р а

1. Леонович И.И., Вырко Н.П. Механика земляного полотна. Минск, 1975. 2. Новоторцев В.Э. Опыт применения теории пластичности к задачам об определении несущей способности оснований сооружений. -- Изв. ВНИИ гидротехники, 1938, т. 22. 3. Евдокимов П.Д. Устойчивость гидротехнических сооружений и прочность их оснований. М., 1966. 4. Григорян С.С., Иоселевич В.А. Механика грунтов. -- В сб.: Механика в СССР за 50 лет. Т. 3. М., 1972. 5. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. М., 1969. 6. Генниев Г.А., Лейтес. Некоторые вопросы статики идеально-пластической среды. -- Исследования по теории сооружений, 1975, вып. XXI.

УДК 626.862.3

Э.И. Михневич

РАСЧЕТ МЕСТНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ ОСУШИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ

Откосы мелиоративных каналов, глубина которых обычно не превышает 2...3,5 м, разрушаются, главным образом, из-за потери местной устойчивости, обусловленной деформациями отдельных зон откоса, находящихся под воздействием грунтовых и наземных вод. Проверки общей устойчивости таких откосов, как правило, не требуется [1].

Зона высачивания грунтовых вод является наиболее неустойчивой частью откоса. Процесс разрушения откоса обусловлен здесь сложным взаимодействием скелета грунта с фильтрационным и поверхностным потоками и особенно интенсивно протекает в несвязных и малосвязных неустойчивых грунтах. Рядом ученых [2...5] проводилась оценка местной устойчивости откосов при действии фильтрационного потока. Г.И. Покровский [6] предпринял попытку учесть дополнительно силы поверхностных вод, предполагая, что они движутся по откосу сплошным потоком в условиях турбулентного режима. Изучение устойчивости песчаного откоса при ламинарном и турбулентном режимах [6] показало, что поток стекает равномерно

по всей поверхности откоса при высоте высачивания $h_B < 5 - 15$ см. С увеличением h_B поток начинает собираться в отдельные ручейки, при этом отношение χ ширины откоса к общей ширине ручейков оказалось равным примерно $3 \dots 7$. Расчет уклона устойчивого откоса предложен в довольно сложном виде с необходимостью определения ряда промежуточных значений по графикам.

А.Ф. Печуров [7] в расчетах местной устойчивости откосов учитывает структурное (молекулярное и цементационное) сцепление C_c между частицами грунта в воде.

Рассмотрим предельное равновесие откоса при действии фильтрационной силы и поверхностного потока, формируемого грунтовыми и дождевыми водами. Согласно принятому в практике учету гидродинамических сил грунтового потока удельную фильтрационную силу f_ϕ направляют по касательной к линии тока и принимают равной произведению объемного веса воды γ_o на гидравлический градиент I_o :

$$f_\phi = \gamma_o I_o \quad (1)$$

Вертикальные силы тяжести γ_c и взвешивания W_B для удобства складывают:

$$\gamma_1 = \gamma_c - W_B = \gamma_c - (1 - n) \gamma_o = (\gamma - \gamma_o) (1 - n), \quad (2)$$

где γ_1 -- объемная масса грунта во взвешенном водой состоянии, г/см^3 . В общем случае сила f_ϕ составляет с нормалью к откосу угол β (рис. 1). Согласно теории фильтрации [4,5] выходные градиенты напора определяются отношением

$$I_o = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \quad (3)$$

Действие на элемент грунта поверхностного потока выразим касательным напряжением τ :

$$\tau = \gamma_o h_p i, \quad (4)$$

где i -- гидравлический уклон поверхностного потока, т. е. $i = \sin \alpha$; h_p -- расчетная глубина поверхностного потока.

Проектируя все силы, действующие на элемент грунта объемом W , на касательную к поверхности откоса (рис. 1), получаем условие его предельного равновесия в виде:

$$W\gamma_1 \sin \alpha + W\gamma_0 \sin \alpha + F\gamma_0 h_p \sin \alpha = W(\gamma_1 \cos \alpha - \gamma_0 \sin \alpha \operatorname{ctg} \beta) \operatorname{tg} \varphi + FC_p, \quad (5)$$

где F — проекция элемента грунта на поверхность откоса.

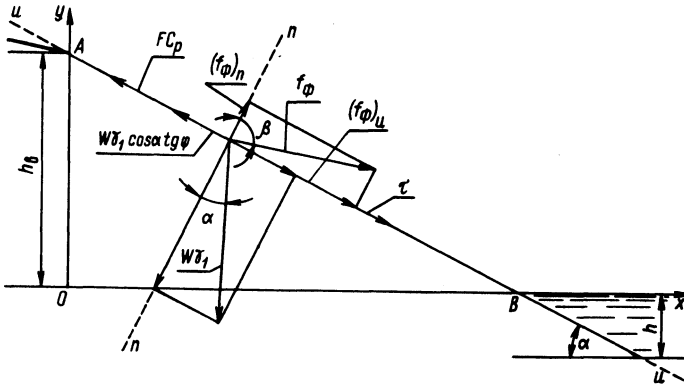


Рис. 1. Схема действия сил на откос в зоне высачивания грунто-

вых вод: $(f_\varphi)_n = W\gamma_0 \sin \alpha \operatorname{ctg} \beta$; $f_\varphi = W\gamma_0 \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$; $(f_\varphi)_u = W\gamma_0 \sin \alpha$;
 $\tau = F\gamma_0 h_p \sin \alpha$.

После некоторых преобразований получаем

$$\frac{\gamma_1}{\gamma_0} + 1 + \frac{h_p}{d} - \frac{\gamma_1}{\gamma_0} f m + f \operatorname{ctg} \beta - \frac{C_p}{d\gamma_0} \sqrt{1+m^2} = 0, \quad (6)$$

где d — расчетный размер частиц грунта на поверхности откоса, см, для песчаных грунтов $d = d_{90}$ (по [7]), для связных грунтов $d = 0,3 - 0,4$ см (по [8]); m — коэффициент заложения откоса, $m = \operatorname{ctg} \alpha$; f — коэффициент внутреннего трения грунта в воде, $f = \operatorname{tg} \varphi$; C_p — расчетное структурное сцепление грунта в воде, г/см^2 , которое будет несколько ниже значения C_c , определяемого по методике А. Ф.

Печкурова [7], в связи с большей площадью действительной криволинейной поверхности отрыва пластинки по сравнению с принимаемой в расчет плоской, а также в силу дополнительных воздействий на естественный грунт различных метеорологических факторов. Поскольку эти воздействия не поддаются строгому учету, выразим их приближенно (полагая, что они будут несколько возрастать с увеличением крутизны откоса и учитывая также приводимые в литературе рекомендации о снижении расчетных характеристик грунта) коэффициентом

$$\alpha_c = \frac{0,75}{\sqrt{1 + \frac{1}{m^2}}} . \text{ Тогда } C_p = \frac{0,75 C_c}{\sqrt{1 + \frac{1}{m^2}}} . \quad (7)$$

Из уравнения (6) с учетом (7) значение коэффициента заложения откоса в зоне высачивания грунтовых вод

$$m = \frac{\gamma'_1 + 1 + \frac{h_p}{d} + f \operatorname{ctg} \beta}{\gamma'_1 f + \frac{0,75 C_c}{d \gamma'_0}} , \quad (8)$$

где $\gamma'_1 = \frac{\gamma'_1}{\gamma'_0}$ — относительная объемная масса грунта в воде.

Из формулы (8) получаем, что в несвязных грунтах ($C_c = 0$) при $h_p = 0$ и $\beta = 90^\circ$ ($I_0 = \sin \alpha$) коэффициент заложения откоса будет

$$m = \frac{\gamma'_1 + 1}{\gamma'_1 f} , \text{ а при } \gamma'_1 = 1$$

$$m = 2 / f , \quad (9)$$

т.е. получаем известное выражение М.М. Гришина [3]. Как отмечается в работе [3], откос уположивается в два раза за счет действия фильтрационного потока. Однако такое положение откос принимает только в частном случае, когда фильтрационный поток направлен параллельно откосу, сложенному несвязным грунтом, а влияние поверхностного потока на формирование откоса не учитывается.

Характер изменения значений угла β по высоте зоны высачивания можно установить, очевидно, путем электрогидродинамического моделирования. Однако различие в грунтовых и гидрогеологических условиях по трассе канала, а также сложность выполнения криволинейных контуров равноустойчивых откосов (без учета поверхностного потока такие контуры

получены Ю.А. Соболевским [4]) в процессе производства работ вызывают необходимость задавать откосу некоторое среднее одинаковое по всей высоте (реже двойное) заложение и для сохранения его устойчивости назначать в различных зонах крепления разной капитальности. Опыты показывают, что расчетный градиент осредненного фильтрационного потока ближе всего соответствует значению $I_o = \operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{m}$ ($\beta = 90^\circ - \alpha$).

Тогда формула (8) для определения первоначального заложения откоса (при $h_p = 0$) может быть представлена в виде

$$m = \frac{(\gamma_1' + 1) + \sqrt{(\gamma_1' + 1)^2 + 4fa_1}}{2a_1}, \quad (10)$$

где

$$a_1 = \gamma_1' f + \frac{0,75 C_c}{d \gamma_o}; \quad (11)$$

в песчаных грунтах часто $\gamma_1' \approx 1$, тогда при $C_c = 0$

$$m = \frac{1 + \sqrt{1 + f^2}}{f}; \quad (12)$$

в частном случае, когда $\gamma_1' = 1$, $f = 0,66$, $m = \frac{2,2}{f}$.

Глубину h_p учитывают только при условии, если поверхность откоса не защищена от эрозионного действия стекающей по откосу воды. Она будет складываться из глубины потоков, создаваемых профильтровавшей грунтовой h_ϕ и дождевой h_d водами, т.е. $h_p = h_\phi + h_d$.

Значение h_ϕ определим, исходя из уравнения неразрывности потока (13), принимая за h_ϕ такую глубину, при которой размыв откоса стабилизируется, а скорости v_H достигают значений неразмывающих:

$$h_\phi = \frac{q}{v_H} = \frac{\chi K h_B}{m v_H}, \quad (13)$$

где q -- удельный расход, приходящийся на единицу протяженности откоса, $\text{см}^2/\text{с}$.

Для определения значений v_H может быть использована следующая экспериментальная формула М.А. Великанова и Н.М. Бочкова, которая, как показали исследования В.М. Шес-

такова [6], в таких случаях вполне приемлема в силу относительно малых значений h_p :

$$v_H = \sqrt{g(15d + 0,6)}. \quad (14)$$

Коэффициент χ неравномерности стекания воды по откосу можно выразить отношением $\chi = \frac{h}{h_B^0}$ (h_B^0 — высота высачивания, при которой наступает переход от сплошного стекания потока по откосу к образованию отдельных ручейков, для песков $h_B^0 \approx 10$ см).

Для определения глубины потока h_d (см), создаваемого на откосе дождевыми водами, в качестве исходного используем уравнение Ц.Е. Мирцхулавы [9]:

$$h_d = \left[\frac{n_o(I_d - U)x}{n'\sqrt{i}} \right]^{0,6}, \quad (15)$$

где I_d — интенсивность выпавших осадков, см/с; U — инфильтрация дождевого стока, см/с; x — расстояние (по горизонтали) от бровки до рассматриваемого сечения, см; i — гидравлический уклон поверхностного потока; n_o — коэффициент шероховатости склона; n' — коэффициент, учитывающий неравномерность стекания дождевых вод по откосу.

Полагая для каналов правильной формы $n_o = 0,022$ [10], $n' = 3$ [9] и учитывая, что $i = \frac{1}{\sqrt{1+m^2}}$, $x = mH_1$, $U \approx 0,4 K$, $[m(1+m^2)^{0,25}]^{0,6} \approx m$, после преобразований получаем следующую расчетную формулу для определения h_d (при $I_d > 0,4 K$):

$$h_d = n_1 m [H_1 (I_d - 0,4 K)]^{0,6}, \quad (16)$$

где n_1 — коэффициент, равный $0,02 \frac{c^{0,6}}{cm^{0,2}}$; H_1 — расстояние по вертикали от бровки до уреза воды, см; K — коэффициент фильтрации грунта, см/с.

Интенсивность дождевых ливней I_d можно определить по формуле Г.А. Алексеева [9]:

$$I_{\text{д}} = \frac{A + B \lg N}{(1 + T)^{2/3}}, \quad (17)$$

где $I_{\text{д}}$ — максимальная интенсивность дождя продолжительностью T (мин) в N лет, мм/мин; A, B — географические параметры, для условий БССР $A = 3 \dots 3,5$; $B = 4$.

Поскольку максимальная зона высачивания грунтовых вод на откосах каналов образуется периодически (во время весенних, летне-осенних и ливневых паводков), эрозионную устойчивость откосов этой зоны достаточно рассчитывать при средней величине $N = 1$, при которой $I_{\text{д}} = 0,48$ мм/мин = $0,0008$ см/с. Сухую периодически затапливаемую зону откоса следует рассчитывать на 20%-ную обеспеченность ($N = 5$ лет), при которой по (17) получаем $I_{\text{д}} = 0,96$ мм/мин = $0,0016$ см/с.

Подставляя значение $h_{\text{р}} = h_{\text{ф}} + h_{\text{д}}$ в уравнение (8), после преобразований получаем расчетную формулу

$$m = \frac{(\gamma_1' + 1) + \sqrt{(\gamma_1' + 1)^2 + 4A_1 \left(\frac{\chi K h_{\text{в}}}{d v_{\text{н}}} + f \right)}}{2A_1}, \quad (18)$$

где

$$A_1 = \gamma_1' f + \frac{1}{d} \left(\frac{0,75 C_c}{\gamma_o} - h_{\text{д}}' \right); \quad (19)$$

$$h_{\text{д}}' = 0,02 \left[H_1 (I_{\text{д}} - 0,4 K) \right]^{0,6}. \quad (20)$$

Порядок расчета. Устанавливают первоначальное предельное равновесие откоса без учета действия поверхностного потока ($h_{\text{ф}} = 0$, $h_{\text{д}} = 0$) по формуле (10) или (12), определяют по нашей зависимости (21) или приближенно по (25) высоту высачивания $h_{\text{в}}$ грунтовых вод на откос с первоначальным заложением, рассчитанным по указанным формулам; уточняют

при необходимости значение коэффициента заложения откоса по формуле (18)

$$h_B = \alpha_T \left(A + \sqrt{A^2 + \frac{m}{2m+1} h_o \bar{q}} \right), \quad (21)$$

где $A = 0,5 \left[(m + 0,5) \bar{q} - \frac{m+1,5}{m+1} h_o \right]$, (22)

$$\bar{q} = \frac{H_o^2 - h_o^2}{2L_o}, \quad \bar{q} = \frac{q}{K}, \quad L_o = L_{yp} + \alpha_\phi H_o, \quad (23)$$

для каналов $\alpha_\phi = 0,134 \frac{T}{H_o}$ при $\frac{T}{H_o} \leq 0,5$, $\alpha_\phi = 0,63 \frac{T}{H_o} - 0,25$ при $\frac{T}{H_o} > 0,5$; (24)

для земляных плотин и дамб $\alpha_\phi = 0,4$ [5]; $\alpha_T = 1,2$ при $m \geq 2$, $\alpha_T = 0,5m + 0,18$ при $1 \leq m < 2$.

Приближенное значение h_B можно определить по формуле Г.К. Михайлова - Р.Р. Чугаева [5]:

$$h_B = \frac{H^2}{2L_o} (1,1m + 0,5). \quad (25)$$

На осушительных каналах расчетную схему фильтрации выбирают при наиболее невыгодных условиях работы откосов, когда вода скапливается на поверхности массива непосредственно за кавальерами на расстоянии, примерно равном двум-трем глубинам русла, или в приоткосных бороздах-собирателях. При этом формируются относительно небольшие пути фильтрации. Расчеты показывают, что при обычно проектируемом заложении откосов $m = 1,5-2,5$ расчетную высоту высачивания можно приближенно принимать для осушителей ($H = 1,5-2,0$ м) $h_B = 0,3-0,5$ м, для коллекторов ($H = 2-2,5$ м) $h_B = 0,5-0,7$ м и для магистральных каналов ($H = 2,5-3,5$ м) $h_B = 0,7-1,0$ м.

Нами сделано сравнение значений m , вычисленных по формуле (18) (при $h^1 = 0$), с опытными данными, измеренными Ф.В. Саплюковым [Д1] на участках рек Морочи и Орессы в нижнем бьефе водохранилищ, где песчаные откосы формировались под воздействием фильтрационного потока, а также с опытными на условной площадке, проведенными на крупномасштаб-

ной модели А.Ф. Печкуровым, В.К. Свистуновым и автором .
 Данные иллюстрированы в виде графика $m = \varphi \frac{h_B}{100 d_{90}}$ (рис .

2), где значения m , вычисленные для естественных отко-
 сов, взяты с коэффициентом запаса $K_3 = 1,1$ (большие откло-
 нения обнаруживаются для откосов, обследованных в натуре) .
 Кривая, приведенная на рис. 2, аппроксимируется выражением

$$m \approx \frac{1}{f} + 0,55 \left(\frac{h_B}{100 d_{90}} \right)^{0,7} .$$

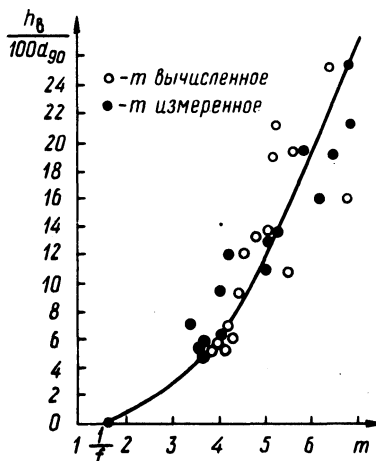


Рис. 2. График зависимости $m = \varphi \frac{h_B}{100 d_{90}}$.

В сухой, периодически увлажняемой зоне уравнение пре-
 дельного равновесия откоса записывается в виде

$$\gamma_H f m + \frac{C}{d} \sqrt{1 + m^2} - \gamma_H - \gamma_O \frac{h_D}{d} = 0, \quad (26)$$

где γ_H -- объемная масса грунта в насыщенном водой сос-
 тоянии, г/см³. Отсюда (с учетом коэффициента запаса $K_3 =$
 $= 1,1$) получаем расчетную формулу

$$m = \frac{1,1 \gamma_H}{\gamma_H f + \frac{1}{d} \left\{ 0,75 C - 0,02 \gamma_O \left[N_1 (I_D - 0,4K) \right]^{0,6} \right\}}, \quad (27)$$

где для условий БССР принимают $I_D = 0,0016$ см/с.

В сухой зоне обычно предусматривают биологическую или
 биохимическую защиту (в последнее время гидропосев) отко-

сов от эрозионного воздействия метеорологических факторов. Тогда влиянием дождевого потока на местную устойчивость откоса можно пренебречь ($h_d = 0$):

$$m = \frac{1,1\gamma_n}{\gamma_n f + \frac{0,75C_c}{d}} \quad (28)$$

При посеве трав на откосы без применения пленкообразующих веществ для закрепления корневой системы растений потребуется определенный период и учет интенсивности дождя $I_d \leq 0,0008$ см/с.

Для подводной зоны фильтрационным давлением на откос можно пренебречь. Здесь коэффициент заложения откоса выражается формулой

$$m = \frac{\gamma_1}{\gamma_1 f + \frac{1}{d}(0,75C_c - K_\Sigma \gamma_0 H I)} \quad (29)$$

где $K_\Sigma = 0,48$; H, I -- соответственно глубина, см, и уклон руслообразующего потока.

Из формулы (29) видно, что достичь устойчивого положения откоса в подводной зоне путем его уполаживания (без крепления) можно только при положительных значениях знаменателя. Иначе будет происходить интенсивный размыв откосов, уширение и обмеление русла до тех пор, пока оно не примет устойчивую форму, и глубина воды в нем не уменьшится до допустимого на размыв значения H_d .

Л и т е р а т у р а

1. Указания по расчету устойчивости земляных откосов. Л., 1971.
2. Маслов Н.Н. Условия устойчивости склонов и откосов в гидроэнергетическом строительстве. М.-Л., 1959.
3. Гришин М.М. Гидротехнические сооружения. М., 1962.
4. Соболевский Ю.А. Водонасыщенные откосы и основания. Минск, 1975.
5. Чугаев Р.Р. Земляные гидротехнические сооружения (теоретические основы расчета). Л., 1967.
6. Шестаков В.М., Кузнецова Н.А. Фильтрационная устойчивость песчаных откосов. -- Труды ин-та ВОДГЕО. М., 1958.
7. Печуров А.Ф. Основы проектирования водоприемников и каналов осушительно-увлажнительных систем. -- В сб.: Проблемы Полесья. Вып. 2. Минск, 1973.
8. Мирцхулава Ц.Е. Размыв русел и методика оценки их устойчивости. М., 1967.

9. Мирцхулава Ц.Е. Инженерные методы расчета и прогноза водной эрозии. М., 1970. 10. Чугаев Р.Р. Гидравлика. Л., 1971. 11. Зубец В.М., Саплюков Ф.В. Исследование и расчет устойчивости низовых откосов плотин и берегов отводящих русл в нижних бьефах водохранилищ, совмещенных с рыбхозами. -- В сб.: Комплексное использование малых водоемов. Елгава, 1977.

УДК 624.131.552.6

Н.Д. Банников, Ю.А. Соболевский,
П.И. Харитonenko

К ВОПРОСУ О ЗАТУХАНИИ ИЗБЫТОЧНЫХ НАПОРОВ ПРИ КОНСОЛИДАЦИИ АНИЗОТРОПНЫХ ПО ВОДОПРОНИЦАЕМОСТИ ОСНОВАНИЙ

Прогнозирование во времени величины избыточного напора обеспечивает предпосылки для получения графиков протекания осадок сооружений, возведенных на водонасыщенных грунтах.

Процесс затухания напоров при приложении нагрузки к ограничивающей поверхности анизотропного по водопроницаемости основания для случая плоской задачи описывается уравнением Фурье [1] вида

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{1 + \epsilon_{\text{ср}}}{\gamma_0 a} \left(K_x \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} \right), \quad (1)$$

где H -- избыточный напор в грунтовой массе; t -- текущая координата времени; $\epsilon_{\text{ср}}$ -- средний коэффициент пористости; γ_0 -- объемная масса воды.

Вводим следующие допущения: 1) грунт находится в состоянии двухфазной системы; 2) твердая и жидкая фазы несжимаемы; 3) характеристики грунта (коэффициенты фильтрации как по горизонтали K_x , так и по вертикали K_y , а также коэффициент сжимаемости a постоянны; 4) грунт изотропен в механическом отношении; 5) передача нагрузки осуществляется через дренажную прослойку.

Решение уравнения (1) с использованием указанных допущений при соответствующих краевых условиях дает возможность определить значения напорной функции H для любого момента времени t после нагружения основания.