

"Гидротехника и мелиорация", 1968, №1, 4. Климко А.И. Об использовании вакуума при осушении сельскохозяйственных земель. — "Гидротехника и мелиорация", 1964, №12. 5. Калантаев В.А. Эффективность применения вакуума в закрытых горизонтальных дренажных системах в условиях орошения. Автореф. канд.дис.М., 1965. 6. Минаев И.В., Майорчик А.Н., Горезко Т.П. Экспериментальная проверка работы горизонтального вакуумированного дренажа в полевых условиях. — "Науч.-техн. инф. по мелиорации и водному хозяйству", 1971, №10. 7. Шимко К.И., Минаев И.В., Горезко Т.П. Экспериментальная проверка работы горизонтальной вакуумированной дрены в лабораторных условиях. — "Науч.-техн. инф. по мелиорации и водному хозяйству", 1971, №4.

В.К. Свистунов

ИЗУЧЕНИЕ ЗОНЫ ВЫКЛИНИВАНИЯ ГРУНТОВЫХ ВОД ПРИ ШЛЮЗОВАНИИ КАНАЛОВ

Значительное влияние на устойчивость фильтрующих откосов оказывает высота выклинивания грунтового потока. При работе каналов в обычном гидрологическом режиме она может отсутствовать или быть очень малой. В совершенных осушительно-увлажнительных системах, когда вода подается в канал для подъема уровней грунтовых вод, а затем сбрасывается после 8—12 дней стояния на высоких горизонтах, наблюдается определенная зона выклинивания. Особенно она заметна при интенсивном сбросе воды с верхнего бьефа. Уровни грунтовых вод не успевают следовать за горизонтом воды в канале и кривая депрессии в приоткосной зоне и в зоне выхода на дневную поверхность имеет криволинейную форму.

Исследования по установлению зоны высачивания и ее влиянию на деформируемость русел проводились на крупномасштабной модели откоса канала. Были определены все грунтовые характеристики откоса. По классификации В.В. Охотина [1] грунт откоса отнесен к среднезернистому песку с объемным весом $\gamma = 1,51--1,64 \text{ г/см}^3$, удельным — $2,67 \text{ г/см}^3$. Коэффициент пористости грунта, определенный после серии опытов, распределялся следующим образом: в нижней части откоса он был равен $0,622--0,674$, в средней — $0,675--0,724$, в верхней — $0,743$. Такое увеличение коэффициента пористости по высоте

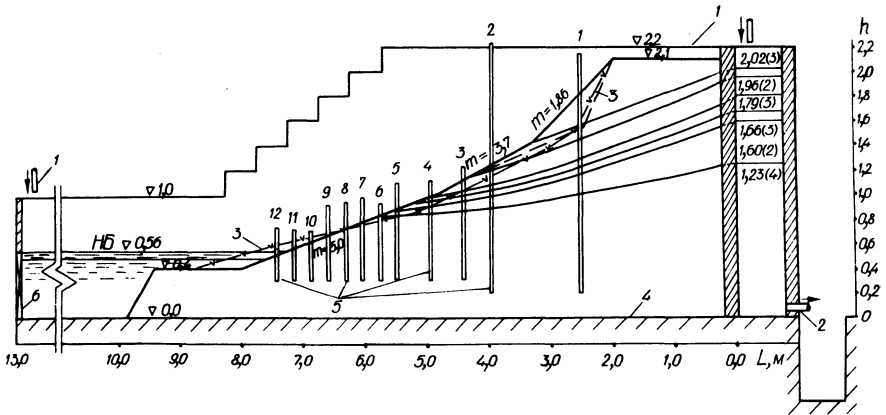


Рис. 1. Высачивание грунтового потока на откос при разных напорах в баке:
 1,2—подвод и сброс воды соответственно; 3—очертание откоса после опыта №2; 4—водоупор (цифры в скобках—номера опытов); 5—колодцы (1—12); 6—шлюз.

откоса понятно. Грунтовой поток, выклинивающийся на поверхность, уносит мелкие фракции грунта вниз к подножью откоса, заполняя тем или иным образом поры грунта. Образцы, отобранные по глубине, показали сходимость коэффициентов, которые мало отличались по значению. Коэффициент внутреннего трения сухого грунта был равен 0,657—0,678, водонасыщенного 0,583—0,642. Структурное сцепление грунта, которое определялось методом отрыва цементированной пластинки А.Ф. Печкурова [2], равнялось 0,002—0,003 г/см². Коэффициент фильтрации среднезернистого песка был равен 14 м/сут.

Параметры смоделированного откоса показаны на рис. 1. Длина камеры от напорной стенки до водосборного шлюза равна 13,0 м, ширина камеры (ширина откоса) — 3,56 м, высота h камеры 2,2 м. Вода подавалась как в напорный бак (верхний бьеф), так и нижний бьеф (НБ). Сброс с нижнего бьефа осуществлялся через затвор в шлюзе, с верхнего бьефа — через отверстие в задней стенке. Опыт проводился на откосе с заложением $m = 5,0$. Мощност водопроницаемой подушки ниже подошвы откоса равнялась 0,4 м. В верхней части откос был более крутой ($m = 1,86$).

Для фиксации кривой депрессии грунтового потока были установлены колодцы из полиэтиленовой перфорированной дре-

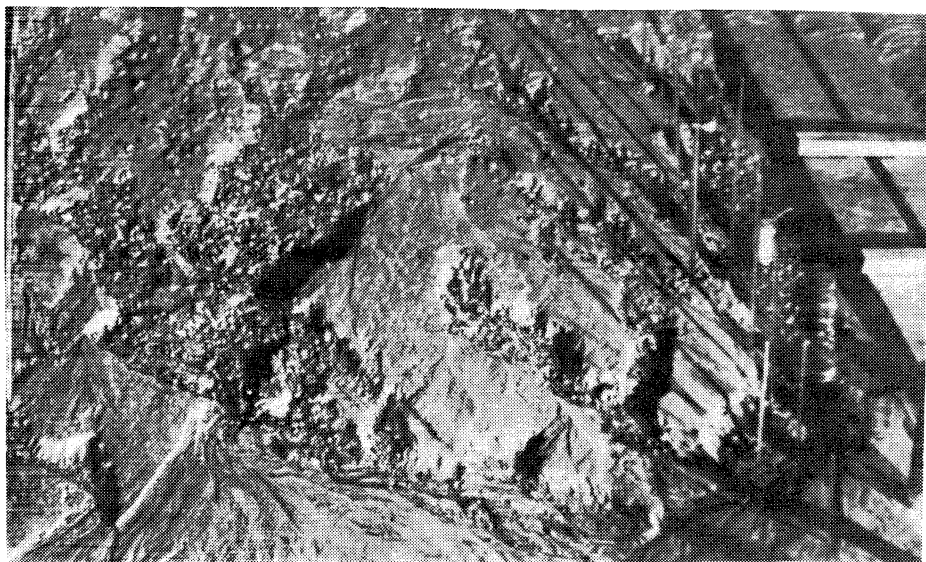


Рис. 2. Деформация смоделированного откоса при высоте высачивания $a_0 = 77$ см.

нажной трубы $d = 5$ см, обмотанные стеклотканью. Уровни в колодцах измерялись при помощи специального электрического шупа. В напорном баке и нижнем бьефе поддерживались определенные горизонты. При этом фиксировались различные зоны высачивания.

Опыты проводили в таком порядке. Опыт начинался тогда, когда поток грунтовых вод в теле модели откоса можно было считать установившимся. Это показали пьезометры, установленные по откосу, и замеры фильтрационного расхода через шлюз. Когда он не отличался на 1--2%, фиксировался уровень воды в баке, который поддерживался в течение всего опыта. При горизонте воды в баке 2,0 м фильтрационный расход через откос по всей ширине камеры составил 0,283 л/с. Наблюдаемая при этом зона выклинивания была равна по высоте 77 см. При такой высоте выклинивания наблюдается значительная деформация откоса. Сначала появляются локальные смывы грунта. Затем они увеличиваются и образуются полосы размыва, которые достигают значительных размеров (рис. 2). Во время выклинивания грунтового потока в течение 5--7 ч глубина полос размыва в отдельных местах достигает 9--14 см, ширина -- 0,2--0,6 м. За зоной высачивания вверх по откосу начинается оплывание и обрушение откоса.

Грунтовый поток, высачивающийся на дневную поверхность, перемещается к подошве откоса с определенной скоростью. Для фиксации этих скоростей применялась анилиновая краска, которая впускалась в стекающий поток. По высоте откоса скорость стекающего потока была следующей:

1) в низовой части откоса (6,5 м от напорного бака) $v = 0,415$ м/с; 2) в средней (5,0 м) $v = 0,317$ м/с; 3) в верхней (4,4 м) $v = 0,148$ м/с.

В местах сосредоточенного стока грунтовой воды, который наблюдался в различных местах по откосу, замерялась высота слоя стока. В верхней зоне откоса она равнялась 1,5—2,0 мм, в средней — 2,5 мм, в низовой части слой стока равен 0,5—1,5 мм. В результате смыва мелких песчаных фракций и переноса их в низовую зону откоса установились следующие заложения откоса (табл. 1).

Таблица 1. Установившиеся коэффициенты откоса по высоте после опыта № 2

Зоны откоса по высоте	Коэффициент откоса m	
	правая сторона камеры	левая сторона на камеры
Верхняя часть (от 3 до 4,5 м)	4,1	3,5
Средняя часть (от 4,5 до 6 м)	5,0	4,6
Низовая часть (от 6 до 8 м)	10,0	8,2

Примечание. В скобках указаны расстояния от напорного бака.

Слой стока от выклинившейся грунтовой воды принимается равным или больше расчетного диаметра зерен песчаного грунта [2]. Если рассматривать средний слой стока по всей площади откоса, то можно сказать, что он был равен $d_{10} = 0,5$ мм (по интегральной кривой). Результатом переноса частиц к подошву откоса явилось заиливание в низовой части, которое равнялось $0,952$ м³ на пог. м. На всю ширину камеры (3,56 м) объем заиливания составил $3,48$ м³ (рис. 1).

С целью уточнения гидравлических градиентов при выходе грунтового потока на поверхность откоса в одном из опытов на глубину 1,0 см устанавливались стеклянные пьезометры, которые располагались через 20—25 см по откосу на протяжении всей зоны высачивания. По показаниям пьезометров была построена эпюра выходных градиентов напора для участка высачивания (рис. 3). Надо отметить, что гидравлические гра-

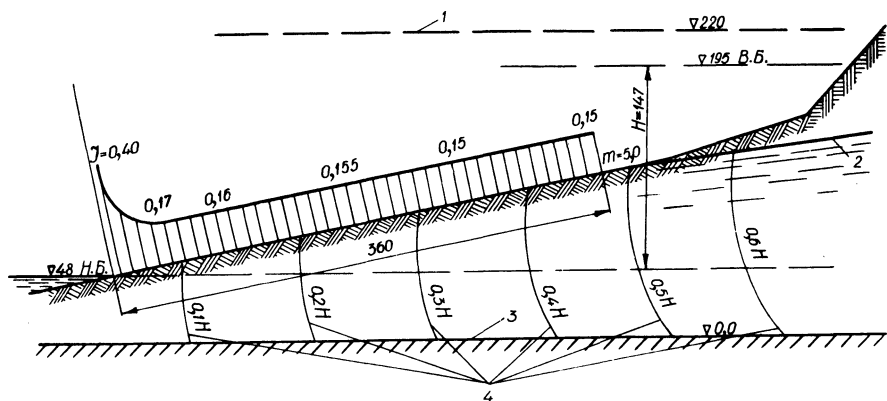


Рис. 3. Эпюра выходных градиентов напора для участка высачивания:

1—стенка лотка; 2—кривая депрессии; 3—водоупор; 4—эквипотенциали.

диенты, подсчитанные по формуле $I = \sin \alpha$ (α — угол наклона откоса к горизонту), имели почти на всем протяжении участка высачивания одни и те же величины (0,15—0,16) и только в непосредственной близости от уреза воды в нижнем бьефе они возросли (до 0,4). В исследованиях И.Ф. Володько [3] наибольшие градиенты также имели место на урезе воды и были равны 0,52.

Часто в осушительно-увлажнительных системах для подъема уровня грунтовых вод на прилегающей к каналу территории необходимо длительное время поддерживать горизонты воды в канале на высоких отметках. Через некоторое время в нижнем бьефе за водоподпорным сооружением начинается выклинивание грунтового потока на дневную поверхность. Это время зависит от водопроницаемости почвы и длины пути фильтрации. Высачивание может произойти в непосредственной близости за сооружением или на некотором удалении от него.

Известно, что все водоподпорные сооружения имеют в нижнем бьефе соответствующие крепления (железобетонные фильтрующие плиты, пригрузка крупнозернистым материалом, одерновка и др.), длина и высота которых устанавливается по расчету. Когда высачивание за водоподпорным сооружением находится в пределах высоты крепления, то гидродинамическое давление воспринимается этим креплением. Если грунтовый по-

ток выклинивается в незакрепленном откосе, то нижняя часть песчаного откоса подвергается разрушению. Деформация нижней части вызывает дополнительные сдвигающие усилия на вышележащие слои, что в конечном итоге приводит к общему обрушению откоса. Высокий перепад уровней верхнего и нижнего бьефов ведет к возникновению гидродинамического давления, которое характеризуется определенными гидравлическими градиентами. Величина их зависит от высоты высачивания грунтового потока, коэффициента откоса m , глубины канала за сооружением, длины пути фильтрации и т.д. Иногда верхняя граница зоны высачивания наблюдается выше крепления и сил сопротивления в виде внутреннего трения и структурного сцепления между частицами недостаточно для удержания откоса от обрушения. Чтобы избежать нежелательных деформаций откосов каналов, работающих как на подъем, так и на интенсивный спад уровней в них, необходимо при подъеме воды в верхнем бьефе учитывать глубину воды в них за подпорным сооружением.

Значительное влияние на устойчивость каналов оказывает интенсивность спада уровня при шлюзовании. Средние величины выходных гидравлических градиентов грунтового потока в верхнем бьефе и высота высачивания будут зависеть от скорости опускания горизонта воды в канале. При этом откосы могут деформироваться на большом удалении от водоподпорного сооружения. Значительная интенсивность сброса горизонта воды в русле ведет к тому, что уровни грунтовых вод в приоткосной зоне отстают от уровня воды в канале. При этом наблюдается соответствующая зона высачивания. Эта зона может возрастать к подошве откоса и, когда уровень в канале достигнет своего межженного стояния, высота высачивания может быть такой величиной, при которой начнется оползание разжиженного грунта. Грунт откоса в водонасыщенном состоянии подвержен гидродинамическим силам, и в нем изменяются геофизические свойства. Так, угол внутреннего трения водонасыщенного песка уменьшается на $1-3^{\circ}$ по сравнению с углом внутреннего трения грунта в сухом состоянии. В связи с этим устойчивость откоса и его крепления значительно уменьшается.

Наблюдения показывают, что направления линий тока в теле откоса изменяются по его длине. Фильтрационная сила Φ , направленная по касательной $K-K$ к кривой депрессии в точке выхода ее на поверхность откоса, составляет с нормалью к откосу некоторый угол β (рис. 4), который может изменяться

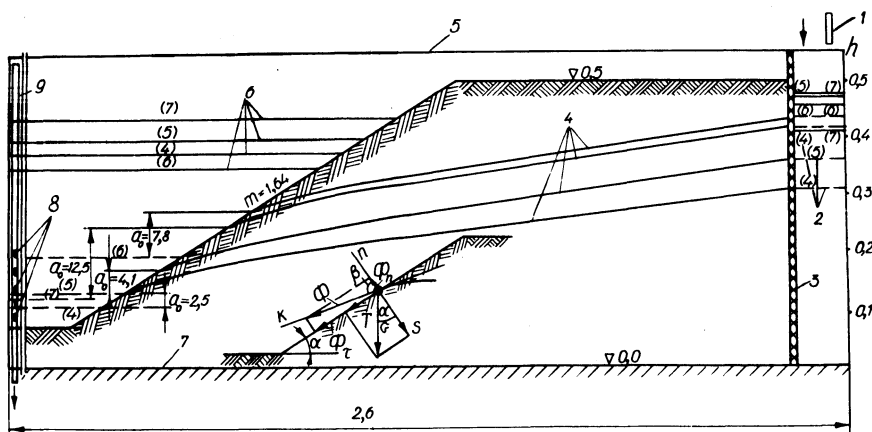


Рис. 4. Зоны высачивания при разных интенсивностях спада уровня воды в нижнем бьефе:
 1—подвод воды; 2,6 — уровни воды НБ и ВБ после сброса и до сброса соответственно (цифры в скобках — номера опытов); 3—металлическая сетка; 4—кривые депрессии в теле откоса после спада уровня в НБ; 5—стенка лотка; 7—водоупор; 8—окна для сброса воды; 9—сбросная труба.

в определенных пределах. По Р.Р. Чугаеву и Ю.А. Соболевскому [4, 5], градиенты напора в зоне выхода грунтового потока на откос определяются по зависимости

$$I = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}, \quad (1)$$

где α — угол наклона участка высачивания к горизонту.

Для определения устойчивости фильтрующего откоса выясним положение, при котором твердые частицы грунта на поверхности откоса, находящиеся под воздействием гидродинамических сил, будут находиться в равновесии. Выделим на поверхности откоса единичный объем и рассмотрим силы, действующие на него (без учета сил сцепления и действия поверхностного потока).

1. Сдвигающие силы: $T = \gamma_r \sin \alpha$ и Φ — гидродинамическое давление, которое раскладывается на составляющие Φ_n и Φ_τ (Φ_n направлена по нормали к откосу, Φ_τ — по касательной к линии откоса),

$$\Phi_n = \gamma_o \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \cos \beta f = \gamma_o I \cos \beta f. \quad (2)$$

$$\Phi_{\tau} = \gamma_0 \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \sin \beta = \gamma_0 \sin \alpha, \quad (3)$$

где γ_{Γ} — объемный вес взвешенного в воде грунта; γ_0 — объемный вес воды.

2. Удерживающие силы

$$S = \gamma_{\Gamma} \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi_0, \quad (4)$$

где $f = \operatorname{tg} \varphi_0$ — коэффициент внутреннего трения.

Спроектировав все силы, действующие на единичный объем, получим условие предельного равновесия в следующем виде:

$$\Phi_{\tau} + T = S - \Phi_n, \quad (5)$$

$$\gamma_0 \sin \alpha + \gamma_{\Gamma} \sin \alpha = \left(\frac{1}{K} \gamma_{\Gamma} \cos \alpha - \gamma_0 \sin \alpha \operatorname{ctg} \beta \right) f,$$

откуда

$$K = \frac{\gamma_{\Gamma} f \cos \alpha}{\sin \alpha (\gamma_0 + \gamma_{\Gamma} + \gamma_0 f \operatorname{ctg} \beta)}, \quad (6)$$

где K — коэффициент запаса, который из условия устойчивости откоса должен быть больше единицы.

Преобразуем выражение (6)

$$K = \frac{\gamma_{\Gamma} f \cos \alpha}{\sin \alpha [\gamma_0 (1 + f \operatorname{ctg} \beta) + \gamma_{\Gamma}]}$$

Так как

$$\operatorname{ctg} \alpha = m,$$

где m — коэффициент откоса, то

$$K = \frac{\gamma_{\Gamma} f m}{\gamma_0 (1 + f \operatorname{ctg} \beta) + \gamma_{\Gamma}}$$

Для определения угла β необходимо знать направления линий равного напора, которые можно построить графически [6] или при помощи метода ЭГДА. Для подсчета выходных градиентов напора и выявления деформаций откоса при разных интенсивностях спада уровней в нижнем и верхнем бьефах при

шлюзовании были проведены опыты на модели откоса в грунто-
вом лотке следующих размеров: длина 2,6 м, ширина 0,32 м, вы-
сота 0,55 м. Была поставлена цель: как можно быстрее сбросить
воду с нижнего бьефа и проследить положение кривых
депрессии и уровней воды в канале за отдельные промежутки
времени. Механические характеристики грунта откоса были та-
кие же, как и грунта на крупномасштабной модели откоса. Наб-
людения за интенсивностью спада уровней воды в верхнем и
нижнем бьефах проводили для различных коэффициентов откоса
 $m = \text{ctg } \varphi_0$. Записи показаний и подсчет интенсивности спада
уровней вели в табличной форме (табл. 2). Было проведено око-
ло тридцати таких опытов на откосах, сложенных из средне-
зернистых песков. В табл. 2 дан расчет интенсивности спада
уровней в канале с коэффициентом откоса $m = 3,0$.

Таблица 2. Подсчет интенсивности спада уровней в канале и
приоткосной зоне

Время, мин, с	Уровни воды от водоупора h, см		Отстав. уровня Н В, от см	Высота высачива- ния a_0 , см	Продол- житель- ность спа- да уровней t, с	Интенсив- ность спа- да уровней $i = \frac{h}{t}$, см/с		Приме- чание
	Н Б	В Б				Н Б	В Б	
0'0"	46,0	47,0	1,0	0	150	0,02	0,00267	Падаю- щий уро- вень Н В ув- лекает за со- бой ме- льчай- шие пы- леватые части- цы в ви- де гряд. Откос не дефор- мировал- ся.
2'30"	43,0	46,6	3,6	0,6	150	0,0213	0,00333	
5'00"	39,8	46,1	6,3	1,9	135	0,0222	0,00444	
7'15"	36,8	45,5	8,7	2,2	161	0,0205	0,00558	
9'56"	33,5	44,6	11,1	3,1	174	0,0201	0,00633	
12'50"	30,0	43,5	13,5	3,5	250	0,0180	0,0060	
17'00"	25,5	42,0	16,5	4,4	400	0,0152	0,0075	
23'40"	19,4	39,0	19,6	4,4	400	0,0135	0,00548	
30'40"	13,7	36,7	23,0	4,4				

Примечание. Для НБ $\Delta h = 32,3$, для ВБ $\Delta h = 10,3$; $\Sigma t =$
 $= 1840$; $i_{\text{ср НБ}} = 0,0176$ см/с $= 63,2$ см/ч;
 $i_{\text{ср ВБ}} = 0,0056$ см/с $= 20,2$ см/ч.

Установлено, что для различных коэффициентов откоса зона
высачивания a_0 , при которой не наблюдается деформации (оп-
лывания в низовой части) незакрепленного откоса, должна быть
не более величин, указанных в табл. 3. Здесь речь идет об
устойчивости откосов каналов, проложенных в среднезернистых
песках. Нами сделано сравнение измеренных величин a_0 во
время опытов и вычисленных по известным формулам: Чугаева

Таблица 3. Сравнение измеренных допустимых зон высачивания с вычисленными

Коэффициент откоса, m	Глубина воды до водоупора, см		Напор H , см	Расстояние от напорного бака до подошвы откоса, L, м	$\frac{L}{H}$	Измеренная высота высачивания a_0 , см
	ВБ	НБ				
5,0	123	53,7	69,3	10,1	14,6	21,0
4,0	119	54,8	64,2	8,8	13,7	18,0
3,0	108	53,7	54,3	7,8	14,4	13,0
2,0	80	53,7	26,3	7,3	27,8	5,0
1,0	75	53,7	21,3	6,8	31,9	3,0

Примечание. Высота высачивания учитывается по вертикали

[2], Шестакова [8], Дюпки--Казагранде [2], Нельсона--Скорнякова [9], Дахлера [10], Михайлова [11], Нумерова [12], Шайкина [10], Павловского [7].

Вычисленные по формулам величины высот высачивания хорошо согласуются с измеренными за время проведения опытов, что говорит о достоверности наблюдаемых данных.

Интенсивность снижения горизонта воды в канале и уровня грунтовых вод в приоткосной зоне необходимо назначать таким образом, чтобы при достижении уровня в русле наиминишних отметок (т.е. глубины воды в канале в меженьный период) высота высачивания не превосходила указанных в табл. 3 величин.

Наблюдения показали, что скорость падения уровня грунтовых вод в среднезернистом песке во всех опытах находилась в пределах 6--25 см/ч.

При сбросе воды с верхнего бьефа через водоподпорное сооружение необходимо назначать следующие средние величины интенсивности спада уровня в канале с учетом условий нормальной работы, устойчивости незакрепленных откосов каналов, периодически изменяющих гидрологический режим (табл. 4).

Установлено, что сработку горизонта воды в канале можно осуществлять во времени с переменной интенсивностью. В начальный период, когда уровни в канале стоят на одной и той же высокой отметке, что и уровни грунтовых вод в приоткосной зоне, можно скорость спада воды несколько увеличить, но только в пределах снижения первых 30--40 см по высоте откоса. При коэффициенте откоса $m = 5,0$ интенсивность спада

ния, при которых не наблюдается деформации песчаного откоса, по формулам

Высота высачивания, вычисленная по существующим формулам								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
20,8	20,0	18,3	17,6	18,1	22,7	17,2	18,3	17,9
18,2	17,5	16,0	15,5	16,9	19,2	17,1	16,0	15,3
12,7	12,5	11,3	11,1	10,6	15,8	12,4	11,3	11,3
5,0	4,9	4,8	3,8	5,0	7,1	5,0	4,5	5,5
2,3	3,0	2,9	2,0	3,0	4,0	2,5	2,6	2,0

уреза воды в канале до верхней границы участка высачивания.

Таблица 4. Средние величины интенсивности спада уровней в канале

Коэффициент откоса, m	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
Интенсивность спада уровня воды в канале, см/ч	2,0	7,0	28,0	35,0	40,0

можно повысить до 2,6 м/ч, при $m = 4,0; 3,0; 2,0; 1,0$ скорость сброса соответственно возрастает до 1,6; 0,8; 0,6; 0,4 м/ч по сравнению с интенсивностью, приведенной в табл. 4. Но после опускания уровня на 30--40 см ниже первоначального необходимо сброс прекратить до выравнивания горизонтов воды в канале и приоткосной зоне. Иначе говоря, спад уровня можно осуществлять небольшими ступенями с интервалами выдержки во времени до относительной стабилизации уровней в канале и зоне откоса или со средней интенсивностью по всей высоте канала, указанной в табл. 4.

Необходимо отметить, что такие величины интенсивности спада воды можно назначать в каналах глубиной до 2,0--2,5 м. Если же каналы более глубокие, то скорость сброса необходимо устанавливать исходя из высоты высачивания, не вызывающей деформации при достижении уровней наиминишних отметок.

Л и т е р а т у р а

1. Сергеев Е.М. Грунтоведение. М., 1959. 2. Проблемы Полесья. Сб. ст. Вып. 2: Минск, 1973. 3. Володько И.Ф. Ус-

тойчивость песчаных откосов против фильтрующего через них потока грунтовой воды.— "Изв. АН СССР, сер.геолог." 1940, вып. 5. 4. Чугаев Р.Р. Земляные гидротехнические сооружения. Теоретические основы расчета. М., 1967. 5. Соболевский Ю.А. Устойчивость откосов мелиоративных каналов. Минск, 1965. 6. Аравин В.И., Нумеров С.Н. Теория движения жидкостей и газов в недеформируемой пористой среде. М., 1953. 7. Павловский Н.Н. О фильтрации через земляные плотины на непроницаемых основаниях. Л., 1932. 8. Шестаков В.М. Методика определения участка высачивания фильтрационного потока на откос. — В сб.: Информ. материал ВНИИ ВОДГЕО. Вып. 8. М., 1955. 9. Нельсон — Скорняков Ф.Б. Фильтрация в однородной среде. М., 1949. 10. Шанкин П.А. Расчет фильтрации в земляных плотинах. М.—Л., 1947. 11. Михайлов Г.К. О фильтрации в трапецеидальных плотинах на горизонтальном водоупоре. — "Гидротехника и мелиорация", 1952, №1. 12. Аравин В.И., Нумеров С.Н. Фильтрационные расчеты гидротехнических сооружений. Л.—М., 1955.

В.Ф. Карловский, А.А. Мазаник, М.А. Потапчик

ОСАДКА ВПЕРВЫЕ ОСУШАЕМОЙ ТОРФЯНОЙ ЗАЛЕЖИ НА СТРОИТЕЛЬНОЙ ПОЛОСЕ В ПЕРИОД СТРОИТЕЛЬСТВА КАНАЛОВ

Поверхность торфяной залежи на болотных массивах в естественном состоянии покрыта дерновым слоем, который пронизан многочисленными корнями растений. Его прочность зависит от характера и мощности растительного покрова. В ненарушенном состоянии дерновый слой может воспринять нагрузку до $0,20 \text{ кг/см}^2$. Под слоем дернины находится сильно увлажненная торфяная масса, содержащая сухого вещества всего лишь 5—15%. Это значит, что относительная влажность торфяной залежи неосушенного торфяного месторождения колеблется в пределах 85—95%. По содержанию твердой фазы органического вещества А.Ф. Печкуров [1] подразделяет торф по плотности на плотный (с содержанием твердой фазы более $0,15 \text{ г/см}^3$), менее плотный ($0,15 - 0,12 \text{ г/см}^3$), рыхлый ($0,12 - 0,08 \text{ г/см}^3$), почти плавучий ($0,08 - 0,06 \text{ г/см}^3$), плавучий (менее $0,06 \text{ г/см}^3$). Несущая способность таких торфя-