

Л и т е р а т у р а

1. Васильев С. В. и др. Методы фильтрационных расчетов гидромелиоративных систем. М., 1970.
2. Ивицкий А. И. Теория расчета расстояний между дренами с учетом осушительного действия проводящей сети. — ДАН БССР, 1968, т. 12, № 11.
3. Брусиловский Ш. И., Писецкий Г. А. Определение динамики грунтовых вод на осушаемых землях при взаимно-перпендикулярном расположении водопроводящей и регулирующей сетей. — В сб.: Водное хозяйство Белоруссии. Вып. 3. Минск, 1973.
4. Брусиловский Ш. И., Писецкий Г. А. Определение динамики грунтовых вод между дренами с учетом осушительного действия водопроводящих каналов при параллельном расположении каналов и дрена. — В сб.: Водное хозяйство Белоруссии. Вып. 4. Минск, 1974.
5. Лыков А. В., Иванов А. В. Конечные интегральные преобразования и их применение к решению задач теплопроводности. — В сб.: Тепло- и массообмен в процессах испарения. М., 1958.
6. Radcenko J. Drenážny adtok pri neustálenom prúdeni podzemnej vody k drémom. — "Vodohosp. Casopis", 1973, ročník XXI, с. 3-4.
7. Аверьянов С. Ф. Расчет понижения и подъема грунтовых вод при осушении системой каналов (дрен). — "Гидротехника и мелиорация", 1957, № 12.

В. К. Свистунов

СОПРОТИВЛЯЕМОСТЬ КРУПНОЗЕРНИСТОЙ ПРИГРУЗКИ РАЗМЫВУ РУСЛОВЫМ ПОТОКОМ

Наиболее рациональным креплением каналов осушительно-увлажнительных систем, работающих в условиях переменного уровня, являются крепления из хорошо фильтрующих крупнозернистых материалов: щебня, гальки, гравия, крупнопористых бетонных плит и т. д. Особенностью креплений каналов двустороннего действия является то, что они должны обеспечивать своевременное поступление воды в почву из наполненного канала, а также предупреждать возможную деформацию откосов, вызываемую воздействием фильтрационного давления [1] при интенсивном опускании горизонта воды во время опорожнения канала. Кроме того, пригрузка откосов фильтрующим материалом должна противостоять размывающему действию поверхностного и руслового потоков, которые в условиях шлюзования формиру-

ются несколько иначе, чем при работе каналов в обычном гидрологическом режиме.

При сбросе воды из заполненного канала через отверстие подпорного сооружения скорости потока возрастают по мере приближения к гидротехническому сооружению, так как при этом будет очевидной кривая спада уровня воды в канале. Скорости могут достигать различной величины в зависимости от интенсивности спада горизонта воды в канале [2], которую можно задать, сообразуясь с геологическими особенностями откосов, конструктивными параметрами канала и водовыпускного сооружения.

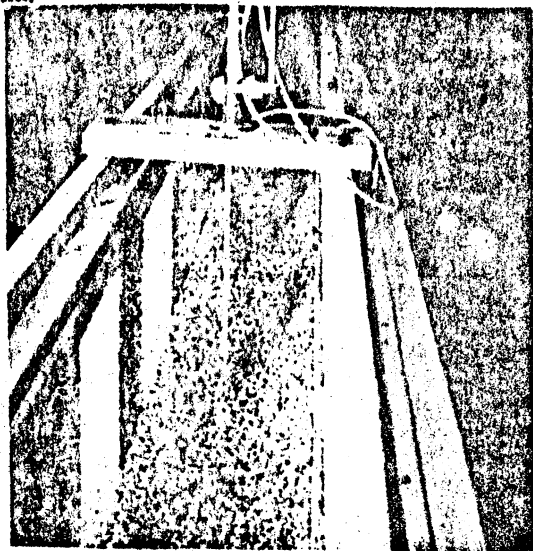


Рис. 1. Исследование устойчивости пригрузки канала против размывающего действия руслового потока в гидравлическом лотке.

С целью установления допустимых скоростей на размыв в зависимости от величины диаметров фракций фильтрующей пригрузки, уложенной на дне и откосах каналов, находящихся в условиях переменного уровня, нами проводились опыты в гидравлическом лотке длиной 15 м, шириной 0,4 м, высотой 0,8 м (рис. 1). Гравий отсортировывался по фракциям со следующими диапазонами диаметров зерен: 1,5—2,0, 1,0—1,5, 0,7—1,0, 0,25—0,7 см. После механического анализа гравий укладывался на откосы и дно сифонированного в лотке канала.

Для каждого диапазона диаметров зерен гравия проводилась серия опытов с различными заложениями откоса m , глубинами потока и ширинами канала по дну. Тщательно планировали откосы и дно канала на всем протяжении лотка. Глубины потока задавали в пределах $(\frac{1}{2} - \frac{1}{5})$ ширины канала по дну, т.е. создавали условия, близкие к натурным. Уклон канала устанавливали с помощью автоматического подъемника. В процессе опытов измеряли глубины потока при помощи мерных игл, установленных на расстоянии 3, 5, 7, 9, 12 м от входного отверстия в лотке. Причем глубины потока создавали не более глубины канала, т.е. поток шел на уровне бровок откоса или чуть ниже. Скорости измеряли трубкой Пито на семи скоростных ординатах по поперечному сечению потока. Поступающий расход фиксировали по мерному водосливу, при этом одновременно измеряли температуру воды для установления кинематического коэффициента вязкости.

Для количественной оценки передвигаемых по дну крупнозернистых наносов в конце лотка была устроена ловушка для осаждения зерен гравия. После каждого опыта снесенный гравий взвешивался и производился дальнейший анализ гранулометрического состава снесенного материала пригрузки, определялись плотность и объемная масса гравия. Опыты проводили при скоростях потока, соответствующих следующим стадиям движения наносов: а) первые сдвиги зерен гравия; б) сплошное передвижение в момент начала образования песчаных волн.

Следует отметить, что в зависимости от превалирующего параметра потока, т.е. большей ширины или большей глубины при прочих равных условиях, и происходили первые сдвиги зерен гравия, а затем размыв дна или откосов.

При малой глубине H и большой ширине потока B (расплывающийся поток) интенсивной деформации подвергалось в основном дно, в то время как частицы на откосе находились в относительно устойчивом положении. Наоборот, при большой глубине и малой ширине потока (суженное русло) наблюдалась преобладающая деформация откосов.

Для оценки направления деформации откоса или дна канала нами были применены зависимости для расчета основных морфометрических характеристик речного русла B и H , которые имеют вид [3]

$$B = 0,458 \frac{Q^{0,5}}{d^{0,1} I^{0,25}}, \quad (1)$$

$$H = 0,232 \frac{Q^{0,25} d^{0,125}}{I^{0,125}} \quad (2)$$

М.А.Великанов [4] дает следующую интерпретацию этих зависимостей:

$$B = 3,4 \left(\frac{Q}{\sqrt{gJ}} \right)^{\frac{2}{5}}, \quad (3)$$

$$H = 0,073 \left(\frac{Q}{\sqrt{gJ}} \right)^{\frac{3}{8}}. \quad (4)$$

Анализ направления деформации русла канала заключается в следующем: если по расчету B получается большим, чем в опыте, то должен размываться откос, если B меньше опытного значения, то деформации подвергается дно. Соблюдение такой закономерности мы наблюдали почти во всех опытах, проведенных в гидравлическом лотке на моделях канала, закрепленного крупнозернистой фильтрующей пригрузкой. И хотя зависимости для определения морфометрических характеристик и выведены рядом авторов для естественных водотоков, все же для предварительной оценки направленности того или иного вида деформации каналов, смоделированных в лабораторных условиях, применять их можно с достаточной точностью.

Вопросу определения начальной сдвигающей и срывающей скоростей посвящено довольно много исследований, однако вполне надежных цифр для характеристики этих скоростей, как считает М.А.Великанов [4], дать еще нельзя. Также нет достаточно обоснованных разработок устойчивости против размыва зерен пригрузки, находящейся на откосе.

Как известно, на твердую частицу, покоящуюся на дне канала, действуют следующие силы: лобовое давление потока, связанное с ее обтеканием, подъемная сила, являющаяся результатом разности скоростей выше и ниже частицы, сила тяжести и "архимедова" сила. Такие же силы будут действовать на частицу, находящуюся на откосе канала, но при этом вес частицы и пригружающее усилие необходимо разложить на две составляющие, одна из которых направлена по нормали к откосу, другая — вниз по откосу. Поэтому частица на откосе будет находиться в менее устойчивом положении, чем на дне при прочих равных условиях. При этом необходимо учитывать две

важнейшие морфометрические характеристики речного русла: ширину B и глубину H . Вообще говоря, можно смоделировать русло таких размеров, что при относительно небольшой глубине потока и большой его ширине, деформация русла начнется со дна, в то время как откосы будут находиться в устойчивом положении.

В наших опытах при отношении $\frac{B}{H} = 2,5-5,0$ отдельные сдвиги гравия всегда происходили раньше на дне канала и только при увеличении уклона или расхода начинались отдельные срывы зерен пригрузки с откоса при сплошном влечении частиц по дну. При отрыве отдельные зерна гравия перемещались в плоскости откоса к его подошве под углом $30-40^\circ$ к оси потока. Скатившуюся к основанию откоса частицу вовлекает в движение перемещающийся по дну поток зерен пригрузки. При таких соотношениях $\frac{B}{H}$ и скоростях потока, соответствующих началу срыва отдельных зерен со дна, не было обнаружено влияние коэффициента заложения откоса, который мы устанавливали в пределах от $m = 1,2$ до $m = 2,4$, на устойчивость частиц пригрузки, находящихся на откосе.

Совершенно другая картина наблюдается при соотношениях морфометрических характеристик $\frac{B}{H} < 2,5$ и донных скоростях, соответствующих началу трогания частиц. Так, в смоделированном канале с параметрами $B = 13$ см, $H = 5,7$ см, $m = 1,8$ при пропуске расхода $Q = 6$ л/с отдельные срывы гравия $d_p = 0,7$ см начались несколько раньше с откоса, чем со дна. Замеренные скорости, соответствующие этой характеристике движения частиц, имели следующие значения: на откосе $v_o = 0,267$ м/с, на дне канала $v_d = 0,335$ м/с. Как видим, скорость отрыва частицы с откоса меньше, чем со дна.

При увеличении коэффициента откоса количество сорванных зерен гравия с откоса и дна начинает сравниваться, т.е. можно сказать, что на пологом откосе частица гравия более устойчива и для ее отрыва необходимо воздействие скорости, близкой к скорости трогания частицы со дна канала. Можно создать такой канал, у которого сопротивляемость поперечного сечения размываемому действию потока будет одинакова по всему смоченному периметру, т.е. возможно сечение канала, близкое к гидравлически наиболее выгодному. К такому сечению обычно и стремятся при проектировании мелиоративных каналов. Но не всегда по геологическим условиям можно смоделировать гид-

гидравлически наиболее выгодный профиль без применения соответствующего крепления канала. Особенно это относится к созданию устойчивого профиля канала в несвязных грунтах. И в ряде случаев проектировщики стремятся к более устойчивому сечению, обеспечивая прочность канала применением всевозможных технически обоснованных и экономически более выгодных типов креплений.

Для анализа полученных величин скоростей руслового потока, соответствующих началу срывов отдельных зерен гравия на дне и откосах, а также для условий сплошного влечения наносов нами проведены вычисления скоростей движения жидкости по известным формулам.

По В.Н.Гончарову [4], срывающая придонная скорость на 25% выше гидравлической крупности и ее можно вычислить для частиц крупностью более 1,5 мм по формуле:

$$\rho_S u_c = 1,02 \sqrt{agD}, \quad (5)$$

где $a = \frac{\rho_S}{\rho} - 1$, ρ_S , ρ -- плотность соответственно частиц и воды.

Г.И.Шамов [4] дает формулу, которая после пересчета ее к придонному слою имеет вид

$$u_c = 1,14 \sqrt{agD}. \quad (6)$$

Для условия статической устойчивости частиц, слагающих русло, В.С.Кнороз [5] приводит выражение, исходя из квадратичного закона сопротивления жидкости, в следующем виде:

$$u_o = 1,3 \left(\lg 14,7 \frac{R}{d^{0,75}} \right) \sqrt{gd}, \quad (7)$$

где u_o -- скорость в слое на расстоянии от дна, равном средней крупности частицы.

С.К.Ревяшко [6], исследуя размываемость грунтов, пришел к выражению для определения нижней границы донной скорости, соответствующей началу трогания отдельных частиц:

$$v'_g = \frac{10^{9,52}}{10^{18,4} n'} \left(\frac{d}{\nu} \right)^{2n'-1} \left(\frac{\gamma_H - \gamma}{\gamma} g d_p \right)^{n'}; \quad (8)$$

$$n^1 = \frac{3,77 + D}{5,65 + 2,225D}; \quad (9)$$

$$D = \ln \left(\frac{\gamma_n - \gamma}{\gamma} g d_p \right) - \frac{2}{3} \ln (g v), \quad (10)$$

где γ_n -- плотность наносов; γ -- плотность воды.

За расчетный диаметр для отдельных диапазонов зерен гравия принимался диаметр наиболее крупнозернистой фракции, содержание которой в смеси составляло для условий начала трогания отдельных частиц грунта 15%, т.е. d_{15} .

В методических указаниях [6] приводится графическая интерпретация кинематического состояния подвижных частиц песчаных грунтов, по которой можно сравнить замеренные опытные скорости для различного диаметра зерен пригрузки, характерные определенной стадии движения частиц. Кроме того, указаны четыре области, в пределах которых укладываются скорости, соответствующие неподвижности донных наносов, безгрядовому перемещению, движению наносов в виде донных гряд и взвешиванию частиц. Надо отметить, что опытные скорости, соответствующие первым срывам зерен гравия на дне укладывались в верхней границе области неподвижности донных наносов. Здесь же заметим, что с опытными данными хорошо согласуются величины донных скоростей, вычисленные по формулам В.Н. Гончарова и Г.И. Шамова для мелкозернистых фракций. Они уменьшаются для крупнозернистых фракций (табл.1). Вычисленные значения для неразмывающих скоростей по формуле В.С. Кнороза получаются несколько завышенными для диаметров зерен гравия 0,25--1,0 см и приближаются к опытным данным для диаметров гравия 1,5--2,0 см. Наиболее близкие значения с опытными данными для всех диапазонов фракций зерен гравия дает формула С.К. Ревяшко для донных скоростей, соответствующих началу трогания отдельных зерен грунта.

Сравнивая опытные скорости начала трогания отдельных частиц со дна и откосов, можно подчеркнуть, что для срыва зерен пригрузки с откоса достаточно скорости на 10--30% меньшей, чем при трогании частицы на дне канала (табл.2). Данное положение необходимо учитывать при проектировании каналов, закрепленных крупнозернистой фильтрующей пригрузкой.

С учетом предельного равновесия размывающего действия руслового потока и сопротивления верхнего слоя грунта размыв-

бу А.Ф.Печкуровым [7] выведена зависимость для коэффициента сил трения на контакте грунта с потоком. Для несвязных грунтов при $\varepsilon + 1 \approx \frac{3}{\delta} - 1$ и $C_c = 0$ критерий устойчивости русла

имеет вид

$$f_H \approx \frac{HI}{d}, \quad f_R \approx \frac{RI}{d}, \quad (11)$$

где $f_H = 0,09$ для начала влечения потока.

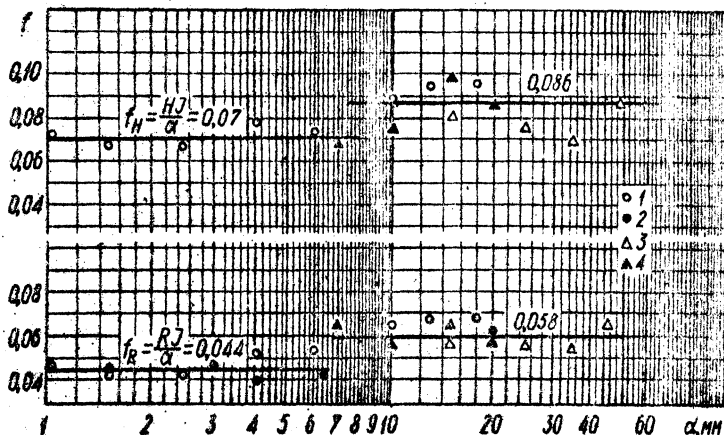


Рис. 2. Критерий устойчивости дна русла, закрепленного крупнозернистой пригрузкой, для стадии движения наносов, соответствующей началу трогания отдельных зерен гравия: 1, 2, 3, 4 — соответственно данные С.К.Ревяшко [4], В.С.Кнороза [5], И.И.Можжея [8], В.К.Свистунова [1, 2].

Вычисленные значения по этим зависимостям в наших опытах а также данные, полученные С.К.Ревяшко, В.С.Кнорозом, И.И.Можжеем, приведены на рис.2. Анализируя опытные величины для критерия устойчивости русла вначале трогания отдельных зерен гравия можно заметить, что $f_H = 0,086$ в диапазоне диаметров от 10 до 50 мм и $f_H = 0,07$ для $d = 1-10$ мм. Для значений коэффициента сил трения f_R также сделано искусственное разграничение по отдельным диаметрам зерен пригрузки. В пределах $d = 6-50$ мм f_R постоянен и

Таблица 1

№ п/п.	I	d, см	B, см	H, см	m	$\frac{B}{H}$
1	2	3	4	5	6	7
на дне						
1	0,018	1,5-2,0	40	9,4	-	-
2	0,018	1,5-2,0	40	9,0	-	-
3	0,022	1,0-1,5	17	6,7	1,43	2,5
4	0,013	0,7-1,0	19	5,8	1,48	3,3
5	0,015	0,25-0,7	20	4,0	1,72	5,0
6	0,013	0,25-0,7	13	5,7	1,8	2,3
на откосе						
7	0,024	1,0-1,5	18	8,0	1,17	2,3
8	0,018	0,7-1,0	20	5,4	1,67	3,7
9	0,012	0,25-0,7	20	5,2	1,83	3,8
10	0,016	0,25-0,7	20	4,3	1,72	4,6
11	0,01	0,25-0,7	17	5,8	1,7	2,9
12	0,013	0,25-0,7	13	5,7	1,8	2,3

Примечание. Звездочками отмечены скорости в средней зоне откоса, замеренные во время сплошного влечения зерен гравия по дну.

Таблица 2

№ п/п.	Скорости по данным опытов		Диаметр зерен гравия d, см	Донная скорость, вычисленная по формулам		
	на дне канала	на откосе канала		В.Н. Гончарова	Г.И. Шамова	С.К. Ревяшко
1	2	3	4	5	6	7
1	0,80	0,605	1,5-2,0	0,584	0,654	0,80
2	0,75	0,582	1,5-2,0	0,584	0,654	0,80
3	0,553	0,383	1,0-1,5	0,507	0,566	0,57
4	0,462	0,360	0,7-1,0	0,413	0,462	0,45
5	0,346	0,312	0,25-0,7	0,346	0,387	0,37
6	0,389	0,310	0,25-0,7	0,346	0,387	0,37
7	0,285	0,236	0,25-0,7	0,346	0,387	0,37
8	0,335	0,267	0,25-0,7	0,346	0,387	0,37

Q, л/с	v, м/с	$v \cdot 10^{-6}$	Донные скорости, вычисленные по формулам			
			В.Н. Гончарова	Г.И. Шамова	С.К. Ревяшко	В.С. Кнороза
8	9	10	11	12	13	14
канала						
39,0	0,80	1,174	0,584	0,654	0,80	0,716
37,0	0,75	1,208	0,584	0,654	0,80	0,708
11,0	0,553	1,116	0,507	0,566	0,57	0,583
9,0	0,462	1,034	0,413	0,462	0,45	0,518
5,0	0,346	1,034	0,346	0,387	0,37	0,428
6,0	0,335	1,034	0,346	0,387	0,37	0,428
канала						
16,0	0,393	1,061	0,507	0,566	0,57	0,623
10,0	0,360*	1,034	0,413	0,462	0,45	0,508
7,0	0,312*	1,034	0,346	0,387	0,37	0,458
7,0	0,310*	1,034	0,346	0,387	0,37	0,436
7,3	0,236*	1,034	0,346	0,387	0,37	0,468
6,0	0,267	1,034	0,346	0,387	0,37	0,455

зоне откоса, замеренные во время сплошного влечения

сленная лам В.С. Кнороза	Отклонение донной скорости от приоткосной				
	$\frac{v_d - v_o}{v} \cdot 100\%$				
	п.2-п.3	п.5-п.3	п.6-п.3	п.7-п.3	п.8-п.3
8	9	10	11	12	13
0,716	24,4	-3,5	7,5	24,4	15,5
0,708	22,4	0,3	11,0	27,2	17,8
0,623	28,9	42,2	30,5	31,0	36,9
0,508	22,1	12,8	22,1	20,0	29,1
0,458	9,8	9,8	19,4	15,7	31,9
0,436	20,3	10,4	19,9	16,2	28,9
0,468	17,2	31,8	39,0	36,2	49,6
0,455	17,3	22,8	31,0	27,8	41,3

равен в среднем 0,058. Для мелких фракций гравия f_R снижается до 0,044. Такая аппроксимация явилась следствием разброса опытных точек для крупных и мелких фракций гравия. В действительности, опытные точки, полученные И.И.Можжеем [8], который работал с крупными фракциями щебня $d = 10-50$ мм, на графике легли около значений $f_n = 0,08$ и $f_R = 0,056$.

Для мелких фракций грунта от 7 до 1 мм у С.К.Ревяшко и В.С.Кнороза опытные точки снижаются до средних значений $f = 0,07$ и $f_R = 0,044$.

Останавливаясь на формировании русла, закрепленного крупнозернистой пригрузкой, можно отметить, что наиболее интенсивно русло переформируется во время движения потока со скоростями, соответствующими сплошному влечению донных наносов. Процесс переформирования сопровождается перемещением зерен гравия по дну по направлению потока и отрывом фракций с откосов и переносом продуктов смыва к их основанию. В одних местах происходит вымыв зерен гравия со дна и влечение его потоком, в других — отложение продукта размыва. При отрыве зерен с откоса происходит постепенное уположивание откоса и в конечном итоге он приобретает парабо-

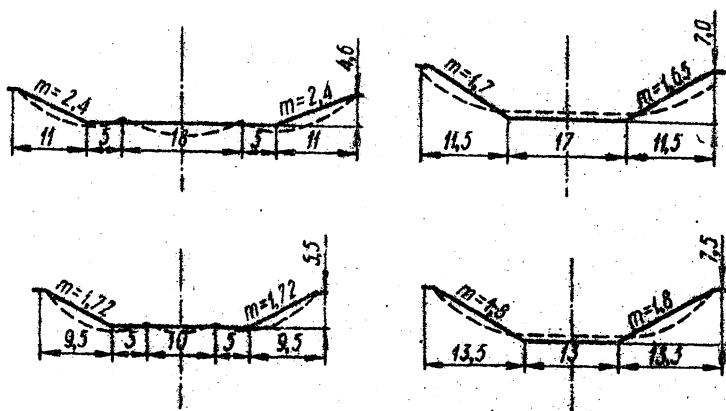


Рис. 3. Деформация канала, закрепленного гравием ($d = 0,25-0,7$ см), после проведения опыта.

лическую форму. Интересно отметить, что дно при этом получается бугристым, если рассматривать поперечное сечение потока (рис. 3).

Таблица 3

Диаметр зерен гравия, см		1,5--2,0	1,0--1,5	0,7--1,0	0,25--0,7
Расход влекомых наносов, кг/с	по данным опытов по	0,0106	0,0029	0,00181	0,00136
	формуле (12)	0,021	0,0079	0,00272	0,00454

Транспортирующую способность потока или расход влекомых наносов можно определить по выражению [7]:

$$q_c = (f_H - f_0) \gamma_{\Delta} Q I, \quad (12)$$

где f_H — критерий устойчивости русла, определяемый по формуле (11); γ_{Δ} — объемная масса воды; Q — расход; I — уклон водотока; $f_0 = 0,08$.

Надо отметить, что по опытным данным расход влекомых наносов для скоростей, отнесенных к сплошному влечению зерен по дну, получился меньше расхода, определенного по формуле (12) для опытных значений входящих в формулу величин (табл.3). Зависимость (12) показывает то максимальное количество влекомых и взвешенных наносов, которое может транспортировать поток. В наших опытах критерий устойчивости всегда был меньше, чем 0,18. Во всех четырех случаях опытные величины расходов влекомых наносов получились в 1,5-3,2 раза меньшими, чем по приведенной зависимости. Иначе говоря, мы не могли достичь полного насыщения потока наносами, что для крупных диаметров зерен гравия трудно выполнимо в лабораторных условиях.

В ы в о д ы

1. Крупнозернистая фильтрующая пригрузка откосов каналов, находящихся в условиях переменного уровня, является надежной защитой поверхностных слоев грунта от размывающего действия русловых и стекающих по поверхности вод.

2. Зерновой состав слоя пригрузки при контакте с потоком необходимо подбирать из расчета допустимых на размыв скоростей для данного расчетного диаметра фракций при условии, что верхний слой пригрузки состоит на 50% из такого материала.

3. Деформация каналов, связанная с отрывом отдельных зерен пригрузки ($d = 0,7--2,0$ см), находящихся на откосе, при соотношениях морфометрических характеристик русла $B/H < 2,5$ происходит при скоростях потока в средней зоне откоса, на 10--30% меньших, чем скорости для начала трогания отдельных частиц со дна.

4. Критерий устойчивости русла, закрепленного крупнопористым материалом, вычисленный по формуле А.Ф.Печкурова, находится в пределах: для крупных фракций гравия $f_H = 0,086$ и $f_R = 0,058$, для мелких фракций с диаметром менее $0,7--1,0$ см $f_H = 0,07$ и $f_R = 0,044$.

Л и т е р а т у р а

1. Свистунов В.К. Исследование устойчивости крупнозернистой пригрузки для песчаного откоса. — В сб.: Мелиорация переувлажненных земель. Минск, 1974.
2. Свистунов В.К. Устойчивость откосов каналов, находящихся под воздействием переменного гидрологического режима. — "Научно-техн. информ. по мелиорации и водн. хоз.", 1974, № 7.
3. Знаменский В.А. Зависимости для расчета устойчивых русел регулируемых рек. — "Бюл.научно-техн. информ. по с-х мелиорации в нечерноземной полосе", 1967, № 3.
4. Великанов М.А. Гидрология суши. Л., 1964.
5. Кнороз В.С. Неразрывающаяся скорость для несвязных грунтов и факторы, ее определяющие. — "Изв. ВНИИГ", 1958, т. 59.
6. Методические указания по гидравлическим расчетам рек-водоприемников и крупных проводящих и ограждающих каналов. Минск, 1972.
7. Печкуров А.Ф. Основы проектирования водоприемников и каналов осушительно-увлажнительных систем. — В сб.: Проблемы Полесья. Вып.2. Минск, 1973.
8. Печкуров А.Ф. Можжей И.И. Защита крупнозернистыми материалами от размыва русел и каналов осушительно-увлажнительных систем. — "Труды ин-та БелНИИМВХ", 1974, т. 22.