

РЕГУЛИРОВАНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ВЗВЕШЕННЫХ ВЕЩЕСТВ В РУСЛООТВОДНЫХ КАНАЛАХ ПРИ ВВОДЕ ИХ В ЭКСПЛУАТАЦИЮ.

Сообщение 2. Предлагаемые усовершенствования методик расчета

© 2011 г. С.Г. Косарев

Восточный филиал ФГУП «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», г. Чита

Ключевые слова: руслоотводной канал, поэтапная промывка, расход воды, несвязный грунт, взвешенные вещества, время промывки.

В результате проведения численного эксперимента с каналами треугольной и трапецеидальной гидравлически наиболее выгодной из форм поперечного сечения определены диаметры частиц, способных перемещаться потоком во взвешенном состоянии на каждом этапе промывки канала, и их масса. Предложена зависимость для назначения расходов воды в руслоотводных каналах при вводе их в эксплуатацию, позволяющая регулировать концентрацию взвешенных веществ в водотоках в пределах нормативных значений.

Введение

При вводе в эксплуатацию руслоотводных каналов в неоднородных по гранулометрическому составу несвязных грунтах содержание взвешенных веществ в месте слияния потоков канала и реки превышает предельно-допустимую концентрацию (ПДК). Продолжительность этого периода, в зависимости от параметров канала, может составлять от нескольких часов до месяца и более.

Поэтапная промывка (постепенное увеличение расхода воды в канале) является одним из способов защиты природных водных объектов от загрязнения взвешенными веществами. В работах [1, 2] расход воды в руслоотводном канале на каждом j -ом этапе его промывки предлагается определять по зависимости, имеющей вид:

$$Q_j = Q_{расч} \cdot \left(\frac{\sum T_j}{T_{пром}} \right)^{2,6}. \quad (1)$$

где $T_{пром}$ – общее время промывки канала:

$$T_{пром} = \frac{M_{эзв}}{Q_{расч} \cdot C_{доп}} = \frac{\chi \cdot l \cdot d_{cp} \cdot P_{эзв} \cdot \rho_{нан}}{Q_{расч} \cdot C_{доп}}; \quad (2)$$

$\sum T_j$ – время промывки нарастающим итогом, с;

$M_{эзв}$ – суммарная масса частиц, выносимых потоком из канала во взвешенном состоянии;

χ и l – смоченный периметр и длина канала, м;

d_{cp} – средний диаметр частиц грунта, слагающего канал, м;

$\rho_{нан}$ – плотность грунта в отложениях, кг/м³;

$P_{эзв}$ – содержание частиц по весу (в долях от единицы) диаметром менее $d_{эзв}$ в грунте, слагающем канал.

Диаметр взвешенных частиц $d_{эзв}$ определяется по гидравлической крупности частиц $W_{эзв}$, способных перемещаться во взвешенном состоянии, из соотношения [3]:

$$W_{эзв} = U_* / 1,7, \quad (3)$$

где U_* – динамическая скорость, соответствующая расчетному расходу $Q_{расч}$.

В методике [1, 2] введено *допущение*, что на каждом j -ом этапе по всему смоченному периметру из слоя толщиной d_{cp} вымываются все частицы диаметром равным и менее $d_{эзв}$. В действительности, с увеличением расхода, а следовательно и глубины воды в руслоотводном канале, увеличивается и динамическая скорость потока, поэтому, на каждом последующем этапе, по мере увеличения расхода воды в канале, должна увеличиваться и крупность частиц, способных перейти во взвешенное состояние.

Введение в методику расчета вышеуказанного *допущения* приводит [4] к увеличению времени промывки начальных этапов и уменьшению последующих, поэтому концентрации взвешенных веществ на начальных этапах промывки ниже предельно допустимых, а на последующих – выше.

Таким образом, задачей настоящих исследований является определение диаметра частиц $(d_{эзв})_j$, способных перемещаться потоком во взвешенном состоянии на каждом

этапе промывки канала, и их массу. Это позволит усовершенствовать предложенную ранее зависимость (1), и обеспечить норматив допустимого сброса по взвешенным веществам в контрольном створе водотока.

Определение диаметра частиц, способных перемещаться потоком во взвешенном состоянии на каждом этапе промывки канала, и их массы

Для определения диаметра ($d_{взвj}$) частиц, способных на каждом j -ом этапе перемещаться потоком во взвешенном состоянии, был проведен численный эксперимент с рядом каналов, имеющих следующие параметры:

Канал № 1 – трапецеидальный гидравлически наивыгоднейшего сечения ($\beta_{ГН} = \left(\frac{b}{h}\right)_{ГН} = 2(\sqrt{1+m^2} - m)$) с коэффициентом заложения откосов $m=2$, расчетным расходом $Q_{расч}=1,014 \text{ м}^3/\text{с}$, глубиной $h=1 \text{ м}$, шириной канала по дну $b=0,47 \text{ м}$, коэффициентом шероховатости $n=0,025$ и уклоном $i=0,000265$. Средний диаметр частиц, слагающих канал, $d_{ср}=0,5 \text{ мм}$.

Канал № 2 – трапецеидальный гидравлически наивыгоднейшего сечения с коэффициентом заложения откосов $m=2$, расчетным расходом $Q_{расч}=10,13 \text{ м}^3/\text{с}$, глубиной $h=3 \text{ м}$, шириной канала по дну $b=1,416 \text{ м}$, коэффициентом шероховатости $n=0,025$ и уклоном $i=0,0000754$. Средний диаметр частиц, слагающих канал, $d_{ср}=0,5 \text{ мм}$.

Канал № 3 – трапецеидальный гидравлически наивыгоднейшего сечения с коэффициентом заложения откосов $m=2$, расчетным расходом $Q_{расч}=30,0 \text{ м}^3/\text{с}$, глубиной $h=5 \text{ м}$, шириной канала по дну $b=2,36 \text{ м}$, коэффициентом шероховатости $n=0,025$ и уклоном $i=0,0000433$. Средний диаметр частиц, слагающих канал, $d_{ср}=0,5 \text{ мм}$.

Канал № 4 – трапецеидальный гидравлически наивыгоднейшего сечения с коэффициентом заложения откосов $m=3$, расчетным расходом $Q_{расч}=1,364 \text{ м}^3/\text{с}$, глубиной $h=1 \text{ м}$, шириной канала по дну $b=0,325 \text{ м}$, коэффициентом шероховатости $n=0,025$ и уклоном $i=0,000265$. Средний диаметр частиц, слагающих канал, $d_{ср}=0,5 \text{ мм}$.

Канал № 5 – трапецеидальный гидравлически наивыгоднейшего сечения с коэффициентом заложения откосов $m=3$, расчетным расходом $Q_{расч}=2,89 \text{ м}^3/\text{с}$, глубиной $h=1 \text{ м}$, шириной канала по дну $b=0,325 \text{ м}$, коэффициентом шероховатости $n=0,025$ и уклоном $i=0,00119$. Средний диаметр частиц, слагающих ложе канала, $d_{ср}=5 \text{ мм}$.

Канал № 6 – трапецеидальный гидравлически наивыгоднейшего сечения с коэффициентом заложения откосов $m=2$, расчетным расходом $Q_{расч}=148,3 \text{ м}^3/\text{с}$,

глубиной $h=5$ м, шириной канала по дну $b=2,36$ м, коэффициентом шероховатости $n=0,025$ и уклоном $i=0,00106$. Средний диаметр частиц, слагающих канал, $d_{cp}=50$ мм.

Канал № 7 – треугольного поперечного сечения с коэффициентом заложения откосов $m=2$, расчетным расходом $Q_{расч}=8,10$ м³/с, глубиной $h=3$ м, коэффициентом шероховатости $n=0,025$ и уклоном $i=0,0000855$. Средний диаметр частиц, слагающих канал, $d_{cp}=0,5$ мм.

При выполнении расчетов исходными данными являлись: средний диаметр частиц грунта, глубина канала, коэффициент заложения откосов и коэффициент шероховатости. Для заданных параметров посредством изменения уклона дна канала определялся расчетный расход в канале из условия равенства средней скорости течения в канале u и неразмывающей скорости $u_{нер}$, определенной по гидравлическому радиусу.

Расчеты выполнялись по известным формулам равномерного движения жидкости в открытых каналах. Для каждого канала определялось (табл. 1) отношение диаметра взвешенных частиц, способных перемещаться потоком во взвешенном состоянии при заданной глубине наполнения канала ($h_j=0,1h, 0,2h$, и т.д. до h) $(d_{взв})_j$, к аналогичному диаметру $(d_{взв})_{max}$ при расчетной (максимальной) глубине его наполнения h , где j – глубина наполнения канала ($0,1h, 0,2h$, и т. д. до h).

Таблица 1. Отношение максимальных значений диаметров частиц, способных перемещаться во взвешенном состоянии, соответствующих текущей и расчетной глубинам наполнения канала

Глубина наполнения канала, h_j/h	Каналы							средне e_{y_i}
	1	2	3	4	5	6	7	
0,1	0,521	0,529	0,532	0,504	0,438	0,420	0,478	0,489
0,2	0,616	0,623	0,625	0,598	0,544	0,535	0,578	0,588
0,3	0,686	0,692	0,693	0,670	0,626	0,620	0,655	0,663
0,4	0,745	0,749	0,750	0,731	0,695	0,691	0,719	0,726
0,5	0,796	0,800	0,801	0,785	0,756	0,753	0,776	0,781
0,6	0,843	0,846	0,846	0,834	0,812	0,810	0,828	0,831
0,7	0,886	0,888	0,888	0,880	0,864	0,862	0,875	0,878
0,8	0,926	0,927	0,928	0,922	0,912	0,911	0,919	0,921
0,9	0,964	0,965	0,965	0,962	0,957	0,956	0,961	0,961

1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
-----	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Результаты расчетов удобно представить в виде степенной зависимости:

$$y = ax^b + c, \quad (4)$$

где x – отношение текущей глубины наполнения канала к ее расчетному (максимальному) значению (h_j/h); y – отношение максимальных значений диаметров частиц, способных перемещаться во взвешенном состоянии, соответствующих текущей и расчетной глубинам наполнения канала $(d_{взв})_j/(d_{взв})_{max}$; a , b и c – численные коэффициенты.

Проанализируем зависимость (4) применительно к рассматриваемому процессу. Очевидно, что при глубине $h_j=0$ ($x=h_j/h=0$), y также равен нулю, так как в этом случае в канале отсутствует движение воды и транспорт наносов, следовательно, свободный член c в уравнении (4) равен нулю. При глубине воды в канале, равной расчетной $h_j=h$ ($x=h_j/h=1$), $(d_{взв})_j=(d_{взв})_{max}$, $y=1$, следовательно, коэффициент a в уравнении (4) равен единице. Таким образом, для описания экспериментальной кривой, функция (4) принимает вид:

$$y = x^b, \quad (5)$$

где показатель степени b назначается таким, чтобы коэффициент детерминации, характеризующий степень рассеяния эмпирических точек вокруг линии регрессии,

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i^{meop} - y_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y}_i)^2}, \quad (6)$$

стремился к единице:

$$R^2 \rightarrow 1. \quad (7)$$

Функция (6) имеет один максимум. Результаты расчетов (табл. 2) показывают, что данная функция максимальна при значении $b=0,33$ ($R^2=0,994$).

Таблица 2. Значения коэффициента детерминации при различных значениях показателя степени b в формуле (5)

Показатель степени b	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35
Коэффициент детерминации, R^2	0,972	0,983	0,990	0,994	0,993	0,989

Таким образом, окончательно, уравнение регрессии имеет вид $y = x^{0,33}$, или, переходя к принятым ранее обозначениям:

$$(d_{\text{эзв}})_j = d_{\text{эзв}} \cdot \left(\frac{h_j}{h} \right)^{0,33} . \quad (8)$$

Суммарная масса взвешенных частиц, выносимых потоком из канала во взвешенном состоянии при его поэтапной промывке, в соответствии с формулой (2) может быть определена как:

$$M_{\text{эзв}} = \chi \cdot l \cdot d_{\text{ср}} \cdot P_{\text{эзв}} \cdot \rho_{\text{нан}} . \quad (9)$$

Введем обозначение: $m_{\text{эзв}} = l \cdot d_{\text{ср}} \cdot P_{\text{эзв}} \cdot \rho_{\text{нан}}$ - удельная (на единицу длины смоченного периметра) масса взвешенных частиц, выносимых из канала при поэтапной промывке, кг/м; $m_{\text{эзв}} = \text{const}$ для любого отдельно взятого канала. Тогда, формула (9) примет вид:

$$M_{\text{эзв}} = \chi \cdot m_{\text{эзв}} . \quad (10)$$

Для дальнейших расчетов будем полагать, что распределение массового содержания частиц грунта, слагающего канал, в интервале от 0 до $d_{\text{эзв}}$ соответствует линейному закону.

Очевидно, что масса взвешенных частиц, выносимых из канала на любом этапе промывки, равна:

$$(M_{\text{эзв}})_j = (\chi_{\text{пр}})_j \cdot m_{\text{эзв}} , \quad (11)$$

причем:

$$\sum (M_{\text{эзв}})_j = M_{\text{эзв}} ; \quad (12)$$

$$\sum (\chi_{\text{пр}})_j = \chi , \quad (13)$$

где $(\chi_{\text{пр}})_j$ – приведенная (средневзвешенная) длина смоченного периметра. Приведенная длина смоченного периметра не имеет строго определенного физического смысла, но в соответствие с формулой (11) может быть определена следующим образом: это отношение массы взвешенных веществ, выносимых потоком из канала на данном этапе, к удельной массе взвешенных частиц, выносимых потоком за весь период промывки.

Определим приведенную длину смоченного периметра:
на первом этапе –

$$(\chi_{np})_1 = \chi_1 \cdot \frac{((d_{636})_1 - (d_{636})_0)}{d_{636}} = \chi_1 \cdot \frac{(d_{636})_1}{d_{636}}; \quad (14)$$

на втором этапе –

$$(\chi_{np})_2 = (\chi_2 - \chi_1) \cdot \frac{(d_{636})_2}{d_{636}} + \chi_1 \cdot \frac{((d_{636})_2 - (d_{636})_1)}{d_{636}}; \quad (15)$$

на третьем этапе –

$$(\chi_{np})_3 = (\chi_3 - \chi_2) \cdot \frac{(d_{636})_3}{d_{636}} + \chi_2 \cdot \frac{((d_{636})_3 - (d_{636})_2)}{d_{636}} \quad (16)$$

и т.д.

Таким образом, раскрыв скобки в выражениях (15) и (16), для приведенной длины смоченного периметра получим зависимость:

$$(\chi_{np})_j = \chi_j \cdot \frac{(d_{636})_j}{d_{636}} - \chi_{j-1} \cdot \frac{(d_{636})_{j-1}}{d_{636}}, \quad (17)$$

или, с учетом полученной ранее формулы (8):

$$(\chi_{np})_j = \chi_j \cdot \left(\frac{h_j}{h}\right)^{0,33} - \chi_{j-1} \cdot \left(\frac{h_{j-1}}{h}\right)^{0,33}. \quad (18)$$

Масса взвешенных веществ, выносимая потоком из канала на каждом этапе его промывки, может быть определена по формуле (11) с учетом полученной зависимости (18).

Назначение расходов воды при поэтапной промывке руслоотводных каналов

Суммарная продолжительность поэтапной промывки определяется формулой (2), а продолжительность отдельно взятого этапа может быть выражено соотношением:

$$T_j = \frac{(\chi_{np})_j}{\chi} \cdot T_{пром} \quad (19)$$

Аналогичным образом определяется относительное время промывки канала нарастающим итогом:

$$\frac{\sum T_j}{T_{пром}} = \frac{\sum (\chi_{np})_j}{\chi} \quad (20)$$

Время промывки каждого этапа непосредственно связано с расходом воды в канале. Значения относительного расхода $Q_j/Q_{расч}$ для каналов треугольной и гидравлически наиболее выгодной трапецеидальной форм поперечного сечения при

$m=2...4$ в зависимости от относительной глубины наполнения канала определены в табл. 3.

В результате выполненных расчетов, установлено, что функция $\frac{Q_j}{Q_{расч}} = f\left(\frac{\sum T_j}{T_{пром}}\right)$

может быть описана степенной зависимостью:

$$\frac{Q_j}{Q_{расч}} = \left(\frac{\sum T_j}{T_{пром}}\right)^2, \quad (21)$$

или

$$Q_j = Q_{расч} \cdot \left(\frac{\sum T_j}{T_{пром}}\right)^2. \quad (22)$$

Таблица 3. Относительный расход для каналов треугольной и гидравлически наивыгоднейшей трапецидальной форм поперечного сечения в зависимости от относительной глубины наполнения канала

Относительная глубина наполнения канала, h_j/h	Относительный расход, $Q_j/Q_{расч}$			
	Трапецидальное гидравлически наивыгоднейшее сечение с коэффициентом заложения откоса			Треугольное поперечное сечение
	m=2	m=3	m=4	
0,1	0,00754	0,00484	0,00372	0,00215
0,2	0,0284	0,0210	0,01800	0,01368
0,3	0,0652	0,0529	0,0477	0,0403
0,4	0,1208	0,1041	0,0970	0,0869
0,5	0,1982	0,1783	0,1697	0,1575
0,6	0,300	0,279	0,269	0,256
0,7	0,428	0,408	0,399	0,386
0,8	0,586	0,570	0,562	0,552
0,9	0,776	0,767	0,762	0,755
1	1	1	1	1

Значения коэффициента детерминации при различных значениях показателя степени в формулах (21) и (22) для каналов различного поперечного сечения представлены в табл. 4.

Таблица 4. Значения коэффициента детерминации при различных значениях показателя степени в формулах (21) и (22)

Форма поперечного сечения канала	Коэффициент детерминации R^2 при значении показателя степени, равном			
	1,8	1,9	2,0	2,1
Трапецеидальная, m=2	0,9966	0,99965	0,99965	0,9971
Трапецеидальная, m=3	0,9958	0,99931	0,99989	0,9980
Трапецеидальная, m=4	0,9952	0,9991	0,99996	0,9984
Треугольная	0,9943	0,9986	0,999997	0,9990

Выводы

1. В отличие от принятого в работах [1, 2] допущения, суть которого состоит в том, что на каждом этапе при расходе $Q_j < Q_{расч}$ вымываются все мелкие частицы, способные перемещаться потоком во взвешенном состоянии при расходе, равном $Q_{расч}$, установлено, что по мере увеличения расхода воды в канале, увеличивается и крупность частиц, способных перейти во взвешенное состояние. Значение диаметра $(d_{вз})_j$ частиц, способных на каждом этапе перемещаться потоком во взвешенном состоянии, может быть определено по предложенной в настоящей работе зависимости (8).

2. Для определения массы взвешенных веществ, выносимых потоком из канала на каждом этапе в режиме его промывки введено понятие «приведенной (средневзвешенной) длины смоченного периметра» $(\chi_{пр})_j$, которая представляет собой отношение массы взвешенных веществ $(M_{вз})_j$, выносимых потоком из канала на данном этапе, к удельной массе взвешенных частиц $m_{вз}$, выносимых потоком за весь период промывки. Для приведенной длины смоченного периметра получена зависимость (18).

3. Отношение приведенного смоченного периметра ко всей длине смоченного периметра, соответствующего расчетному расходу $(\frac{\chi_{пр})_j}{\chi}$, определяет долю взвешенных частиц, вымываемых потоком на каждом этапе промывки. Следовательно, время промывки каждого этапа может быть выражено соотношением (19), а относительное время промывки канала нарастающим итогом по формуле (20).

4. В результате расчетов руслоотводных каналов гидравлически наивыгоднейшей формы поперечного сечения с коэффициентами заложения откосов $m=2\dots4$ и треугольной формы установлено, что функция $\frac{Q_j}{Q_{расч}} = f\left(\frac{\sum T_j}{T_{пром}}\right)$ может быть описана степенной зависимостью (22). Данная зависимость отличается от предложенной ранее в работах [1, 2] формулы (1) показателем степени (в формуле (1) показатель степени равен 2,6).

5. Полученные зависимости позволяют уточнить методику расчета поэтапной промывки руслоотводных каналов и достичь установленных нормативов ПДК по взвешенным веществам на этапе запуска каналов в эксплуатацию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Манилюк Т.А. Защита природных водных объектов от загрязнения взвешенными веществами при вводе в эксплуатацию земляных руслоотводных каналов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2007. 20 с.
2. Косарев С.Г., Манилюк Т.А. Методика расчета поэтапной промывки руслоотводного канала // Водные ресурсы и водопользование: сб. науч. тр. Екатеринбург: 2003. С. 64–68.
3. Гидравлические расчеты водосборных гидротехнических сооружений: Справочное пособие / под ред. А.Б. Векслера. М.: Энергоатомиздат, 1988 . 624 с.
4. Регулирование концентрации взвешенных веществ в руслоотводных каналах при вводе их в эксплуатацию. Сообщение 1. Проблемы, возникающие при применении известных методик расчета расходов воды в руслоотводных каналах // Водное хозяйство России. 2011. № 6. С. 55–62.

Сведения об авторе:

Косарев Сергей Геннадьевич, к. т. н., доцент, руководитель направления русловых процессов Восточного филиала ФГУП «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов (ВостокНИИВХ), 672039, г. Чита-39, ул. Алекзаводская, 30, e-mail: kosarevsg@mail.ru