СССР
МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

ВСЕСОЮЗНЫЙ ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ТРАНСПОРТНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ДЕФОРМАЦИЙ ДНА И РАЗМЕРОВ УКРЕПЛЕНИЙ ЗА ДОРОЖНЫМИ ВОДОПРОПУСКНЫМИ ТРУБАМИ

Москва 1987

gost.e-ecolog.ru

СССР
МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

ВСЕСОЮЗНЫЙ ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ТРАНСПОРТНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

УТВЕРЖДАЮ
Зам.директора института
Г.Д. ХАСХАЧИХ
7 мая 1987

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ДЕФОРМАЦИЙ ДНА И РАЗМЕРОВ УКРЕПЛЕНИЙ ЗА ДОРОЖНЫМИ ВОДОПРОПУСКНЫМИ ТРУБАМИ

Одобрены Главтранспроектом

Москва 1987

УДК 625.745.2:624.137.4

© Всесоюзный ордена Октябрьской Революции
научно-исследовательский институт
транспортного строительства, 1987

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящих Методических рекомендациях излагаются методы определения деформаций дна и размеров укреплений на выходах из равнинных и косогорных дорожных водопропускных труб.

Методические рекомендации позволяют определить глубины и скорости потока на выходах из труб и на укреплениях, выбрать рациональные типы выходных русл, рассчитать максимальные глубины размыва в нижних бьефах, определить размеры укреплений и глубины заделки их концевых частей при различных гидрологических, гидравлических и грунтовых условиях.

Методические рекомендации разработаны в лаборатории мостовой гидравлики и гидрологии ЦНИИСа кандидатами техн. наук Г.Я.Волченковым, В.Ш.Цыпиным и инж. В.В.Беликовым при участии канд. техн. наук Ю.Л.Пейча (МИИТ) и инж. А.Ю.Семенова (Институт общей физики АН СССР).

Зав. отделением изысканий и
проектирования железных дорог А.М.Козлов

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Расчеты выходных русл[1] равнинных и косогорных водопропускных труб с жесткими (недеформируемыми) укреплениями включают:

определение глубин и скоростей на выходе из труб;

назначение типов выходных русл;

вычисление глубин, скоростей и ширины растекания потока на укреплении;

определение глубин размыва за укреплениями;

определение размеров укреплений и глубины заделки их концевых частей.

1.2. Гидравлические характеристики потока на выходах из труб любого поперечного сечения, уложенных с уклонами $i_T \leq 0,5$, находят на основе эмпирических соотношений, при $i_T > 0,5$ их определяют, исходя из установления в выходном сечении трубы нормальной глубины h_0

1.3. Типы выходных русл назначают из числа приведенных в Методических рекомендациях по величине расходов воды в сооружении Q, скоростей на выходах из труб и крупности грунтов выходного лога.

1.4. Гидравлические характеристики потока на укреплениях за трубами в зависимости от требуемой точности расчетов и степени приближения принятых условий к реальным определяют:

а) на основе решения двумерных уравнений гидравлики по разработанной в ЦНИИСе программе для ЭВМ, обеспечивающей построение детального плана течения на укреплении, в том числе при различных уклонах трубы и лога, переменной шероховатости, сложной форме поперечного сечения и планового очертания выходного лога, переменных расходах воды, наличии подтопления нижнего бьефа и т.п.;

[1] Под выходными руслами понимают комплекс устройств, находящихся за выходными оголовками труб (укрепление с концевыми частями, гасители, каменная наброска).

б) с помощью эмпирических зависимостей, основанных на результатах физического и математического моделирования и позволяющих получить глубины, скорости и ширины растекания потока на укреплении для принятых (наиболее характерных) условий, оговоренных ниже.

1.5. При гидравлическом расчете укреплений по эмпирическим зависимостям принят наиболее распространенный случай свободного протекания воды, при котором глубина потока в выходном логе (в бытовых условиях) не оказывает существенного влияния на течение на укреплении. Расчет нижних бьефов дорожных водопропускных труб при несвободном протекании может производиться на основе математической модели либо по Руководству [1, гл. У1] .

1.6. При гидравлическом расчете укреплений по эмпирическим зависимостям их вид различен при различных уклонах выходного лога $i_л$, что объясняется отличиями в характере растекания потока: при $i_л \leq 0,02$ наблюдаются течения с водоворотными зонами, которые сужают ("поджимают") транзитную струю; при $i_л > 0,02$ истечение из трубы происходит в так называемое "сухое" русло, а водоворотные зоны отсутствуют. Эти типы растекания называют соответственно затопленными и незатопленными. При расчете на основе математической модели вид растекания получается автоматически.

1.7. При уклонах трубы $i_т \leq 0,02$ и выходного лога $i_л \leq 0,02$ гидравлические характеристики потока в нижних бьефах дорожных водопропускных труб могут также определяться по зависимостям, изложенным в [1, гл. У1].

1.8. Деформации дна в нижних бьефах труб определяют по эмпирическим зависимостям для гидравлически однородных грунтов выходного лога. Расчеты при неоднородных грунтах выполняются по методике [1, гл. У1].

1.9. Размеры укрепления и глубину заделки его концевой части определяют, исходя из ширины растекания потока и величины воронки размыва.

1.10. Расчеты выходных русл с укреплениями из каменной наброски[1] выполняют по методике, изложенной в [2].

1.11. Расчеты нижних бьефов труб на железных дорогах выполняют на два расхода [3]: расчетный и наибольший, а труб на автомобильных дорогах - только на расчетный. При этом допускаемые скорости для укреплений при прохождении наибольшего расхода повышаются на 35 %, глубины размыва при пропуске расчетного расхода для обеспечения запаса увеличиваются на 20 %.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКА

Глубины и скорости на выходе из труб

2.1. Режим протекания потока в трубах при определении гидравлических характеристик на выходах из них устанавливают согласно [1, гл.1У].

2.2. Глубины потока $h_{вых}$ на выходе из дорожных технически гладких (негофрированных) водопропускных труб различных поперечных сечений при безнапорном и полунапорном режимах протекания и параметрах расхода ΠQ, меньших или равных граничным значениям $\Pi Q(гр)$, определяют из выражения

$$\frac{h_{вых}}{h_к} = A_к f(i_т), \qquad (1)$$

где $h_к$ - критическая глубина в трубе (см. п.2.7).

[1] Все физические величины в Методических рекомендациях представлены в Международной системе единиц СИ. Если употребляются рекомендуемые СТ СЭВ 1052-78 "Метрология. Единицы физических величин" дольные от указанных единиц (например, крупность частиц грунта в мм) или допускаемые к применению единицы, не входящие в СИ, то они записываются непосредственно после значения физической величины.

Функцию уклона $f(i_т)$ находят по формуле

$$f(i_т) = \frac{1}{1+2\sqrt{i_т}}, \qquad (2)$$

а коэффициент $A_к$ и граничные значения параметра расхода для разных типов труб – по табл. 1

Таблица 1

Тип трубы	Граничные значения параметра расхода $\Pi_{Q(гр)}$	Коэффициент $A_к$
Круглая	1,2	0,93
Овоидальная	1,2	0,79
Прямоугольная	0,8	0,88

2.3. Параметр расхода Π_Q определяют по формулам:

для круглых, овоидальных и труб с подобными им поперечными сечениями, очерченными кривыми линиями

$$\Pi_Q = \frac{Q}{D_э^2\sqrt{g D_э}}; \qquad (3)$$

для прямоугольных

$$\Pi_Q = \frac{Q}{b h_т \sqrt{g h_т}}, \qquad (4)$$

где b, $h_т$ – соответственно ширина и высота прямоугольной трубы;

$D_э$ – эквивалентный диаметр трубы

$$D_э = \sqrt{\frac{4}{\pi}\omega_{coop}} = 1.13\sqrt{\omega_{coop}} \qquad (5)$$

Здесь ω_{coop} – площадь поперечного сечения трубы (для круглых труб $D_э$ равен диаметру трубы).

2.4. При параметрах расхода $\Pi_Q > \Pi_{Q(гр)}$ глубины на выходе из труб определяют через относительные глубины потока по формуле

$$\frac{h_{вых}}{h_т} = A_т f(i_т) \Pi_Q^3 \qquad (6)$$

Величина коэффициентов A_T, показателей степени S и диапазон возможного изменения параметров расходов в зависимости от типа труб и режимов протекания приведены в табл. 2.

Таблица 2

Тип трубы	Режим протекания	Параметр расхода Π_Q	Коэффициент A_T	Показатель степени S
Круглая	Любой, кроме напорного	$\Pi_Q \leq 0,8$	0,98	0,50
		$0,8 < \Pi_Q \leq 1,6$	0,88	0,25
Овоидальная	То же	$\Pi_Q \leq 0,8$	0,80	0,55
		$0,8 < \Pi_Q \leq 1,6$	0,75	0,25
Прямоугольная	Любой, кроме напорного	$\Pi_Q \leq 0,8$	0,88	0,667
	Безнапорный	$0,8 < \Pi_Q \leq 1,6$	0,88	0,667
	Полунапорный	$0,8 < \Pi_Q \leq 1,6$	0,83	0,25

2.5. При напорном режиме глубины на выходе из технически гладких труб принимают равными

$$h_{вых} = \begin{cases} 0,85\, h_T, & h_K < h_T \\ h_T, & h_K \geq h_T \end{cases} \qquad (7)$$

2.6. Глубины на выходе из гофрированных труб с коэффициентом шероховатости $n_r = 0,025 \div 0,03$ определяют по формулам [4]:

при $\Pi_Q \leq 0,8$

$$\frac{h_{вых}}{D} = \frac{0,64}{i_T^{0,10}} \Pi_Q^{0,6}; \qquad (8)$$

при $0,8 < \Pi_Q \leq 1,35$

$$\frac{h_{вых}}{D} = \frac{0,65}{i_T^{0,06}} \Pi_Q^{1,9\, i_T^{0,25}}; \qquad (9)$$

при $\Pi_Q > 1,35$ принимают

$$h_{вых} = D \qquad (10)$$

При параметрах расхода $\Pi_Q \leq 0,8$ глубины на выходе из гофрированных труб можно также определять по формулам для круглых труб.

2.7. Критические глубины в трубах $h_к$ определяют по формулам:

при $\Pi_Q \leq 0,8$

$$\frac{h_к}{D} = \Pi_Q^{0,5}; \qquad (11)$$

при $0,8 < \Pi_Q \leq 1,2$

$$\frac{h_к}{D} = 0,95\,\Pi_Q^{0,25}; \qquad (12)$$

для овоидальных труб

при $\Pi_Q \leq 0,8$

$$\frac{h_к}{D_э} = \Pi_Q^{0,55}; \qquad (13)$$

при $0,8 < \Pi_Q \leq 1,2$

$$\frac{h_к}{D_э} = 0,95\,\Pi_Q^{0,25}; \qquad (14)$$

для прямоугольных труб

$$\frac{h_к}{h_т} = \alpha^{1/3}\,\Pi_Q^{2/3}. \qquad (15)$$

Здесь α - коэффициент кинетической энергии, значение которого для труб $\alpha = 1,1$, при этом

$$h_к = 0,482\,q^{2/3}, \qquad (16)$$

где $q = \frac{Q}{b}$ - удельный расход в трубе.

2.8. Для упрощения и ускорения расчетов глубин на выходе и критических глубин рекомендуется пользоваться графиками, приведенными в рекомендуемом приложении 1.

2.9. При уклонах труб $i_т \geq 0,1$ допустимо принимать глубины на выходе из труб равными нормальным глубинам. Графики определения нормальных глубин в технически гладких трубах даны в рекомендуемом приложении 2.

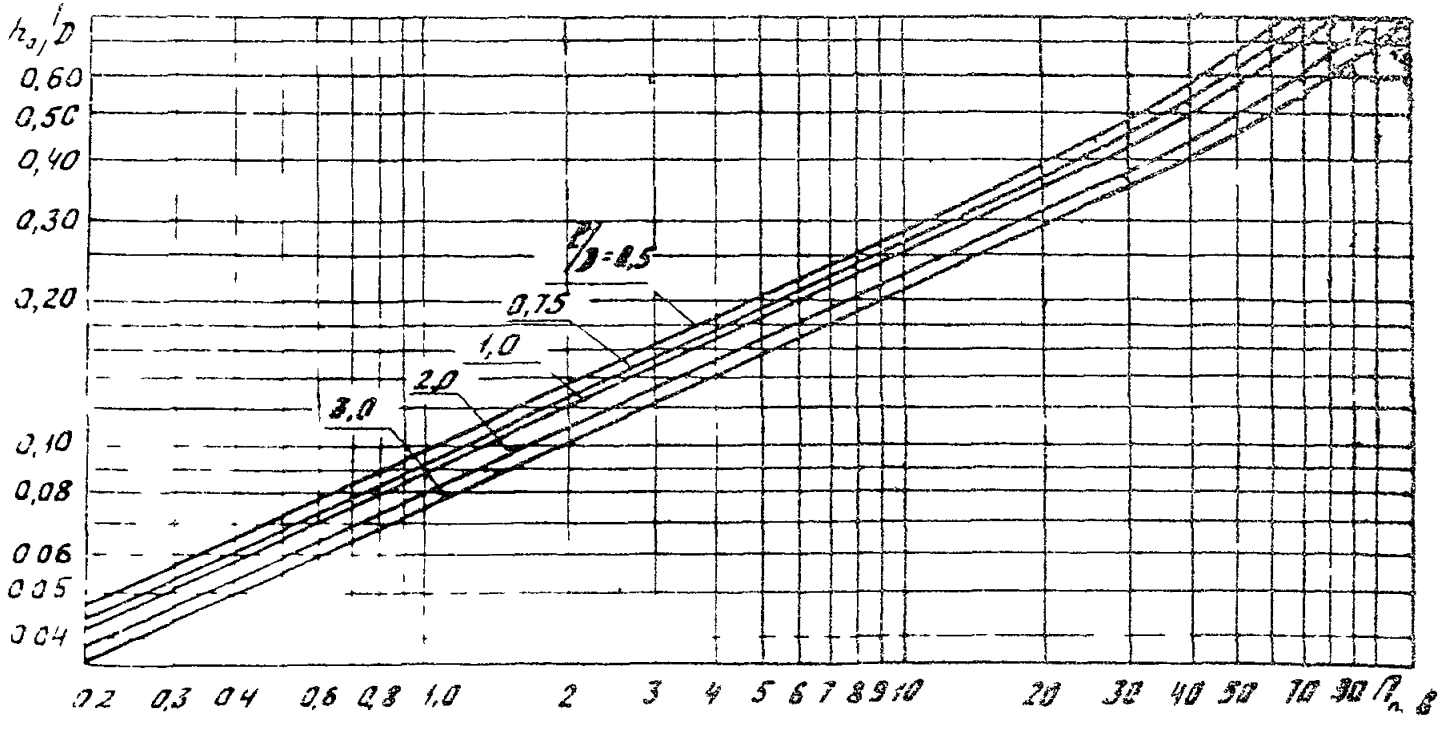


Рис. 1. График для определения нормальных глубин h_0 в круглых трубах при ступенчатой укладке звеньев

2.10. Для труб с повышенной шероховатостью, создаваемой за счет ступенчатой укладки звеньев, при средних уклонах $i_т \geq 0,04$ глубины на выходе принимают равными нормальным глубинам и вычисляют по [1, гл. X] либо по графикам, приведенным ниже.

Для круглых труб пользуются графиком (рис. 1), где по оси абсцисс отложен параметр $П_{пов} = \frac{n_э n_{пов(пр)}}{\sqrt{i_т}} \cdot 10^2$. Приведенную повышенную шероховатость $n_{пов(пр)}$ определяют по графику рис. 2, а (где Δ – высота ступеней), а при $h/D < 0,225$ она корректируется путем умножения на коэффициент K_h, который находится по графику рис.2, б.

Для прямоугольных труб пользуются графиком рис. 3, где по оси абсцисс отложен параметр $П_\Delta = A\sqrt[3]{a/e}/14\sqrt{i_т}$ (e – длина ступеней).

2.11. Скорости на выходе из труб определяют по формуле

$$v_{вых} = Q/\omega_{вых}, \qquad (17)$$

где $\omega_{вых}$ – площадь живого сечения потока на выходе из трубы.

Для прямоугольных труб

$$\omega_{вых} = b\,h_{вых}; \qquad (18)$$

для круглых и овоидальных труб относительную величину $\omega_{вых}/D_э^2$ определяют соответственно табл. 3.

Таблица 3

Относительная глубина потока $h/D_э$	Относительная площадь живого сечения потока $\omega_{вых}/D_э^2$				
	Сотые доли				
	0	2	4	6	8
	Для круглых труб				
0,0	0,000	0,004	0,010	0,019	0,029
0,1	0,041	0,053	0,067	0,081	0,096
0,2	0,112	0,128	0,145	0,162	0,170

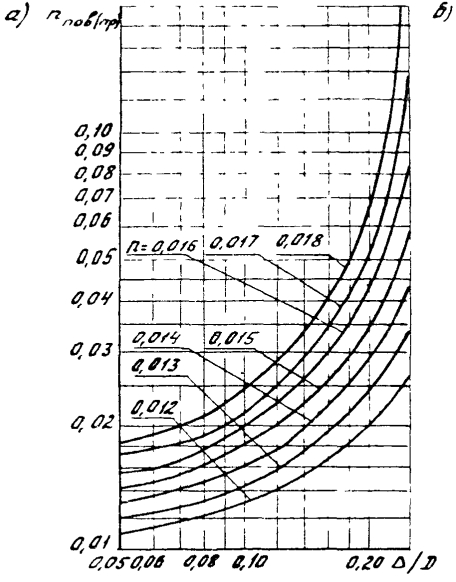
Продолжение табл. 3

Относительная глубина потока $h/D_э$	Относительная площадь живого сечения потока $\omega_{вых}/D_э^2$				
	Сотые доли				
	0	2	4	6	8
0,3	0,198	0,217	0,235	0,255	0,274
0,4	0,293	0,313	0,333	0,352	0,373
0,5	0,393	0,413	0,433	0,453	0,472
0,6	0,492	0,512	0,531	0,550	0,569
0,7	0,587	0,605	0,623	0,640	0,657
0,8	0,674	0,689	0,704	0,719	0,732
0,9	0,745	0,756	0,766	0,775	0,782
	Для овоидальных труб				
0,0	0,00	0,002	0,012	0,022	0,037
0,1	0,052	0,07	0,085	0,102	0,132
0,2	0,137	0,157	0,180	0,200	0,220
0,3	0,240	0,262	0,280	0,302	0,322
0,4	0,340	0,362	0,282	0,400	0,422
0,5	0,437	0,457	0,477	0,492	0,510
0,6	0,527	0,542	0,562	0,580	0,595
0,7	0,612	0,625	0,640	0,655	0,670
0,8	0,680	0,692	0,707	0,722	0,735
0,9	0,745	0,757	0,767	0,777	0,782

С целью упрощения расчетов в рекомендуемом приложении 3 приводятся графики для определения скоростей на выходах из круглых труб.

Расчет гидравлических характеристик потока на укреплении на основе математической модели

2.12. Математическая модель, описывающая течения нижних бьефах водопропускных труб при фиксированной (неизменной во времени) поверхности дна, состоит из системы уравнений двумерной (плановой) гидравлики (уравнений мелкой воды с трением) и граничных условий, соответствующих реальным условиям протекания.



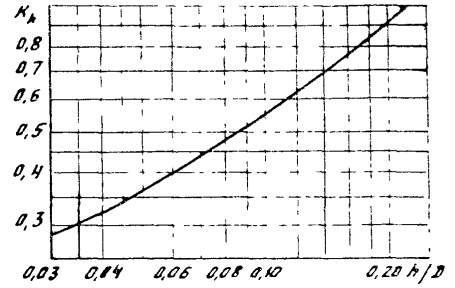


Рис.2. График для определения коэффициента приведенной повышенной шероховатости в круглых трубах:
а – $n_{пов(пр)} = f(\Delta/D)$ при $h/D \geq 0,225$; б – поправочный коэффициент $K_h = f(h/D)$

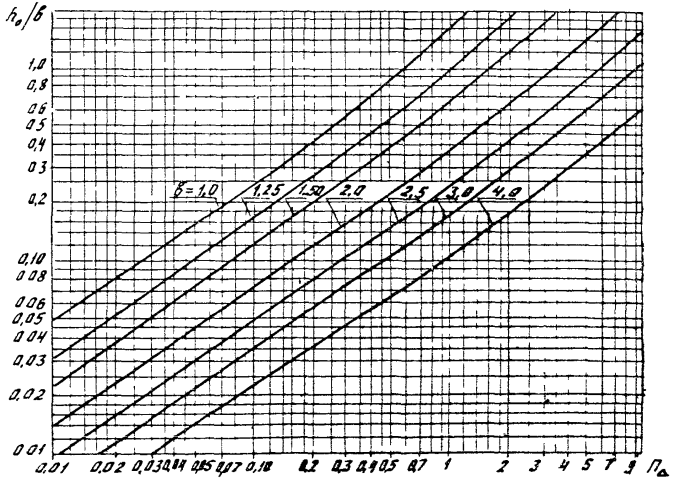


Рис. 3. График для определения нормальных глубин в прямоугольных трубах при ступенчатой укладке звеньев

2.13. Уравнения, записанные в форме интегральных законов сохранения, имеют вид:

$$\left(\iint_G h\vec{v}\,dG\right)_t + \oint_\sigma h\vec{v}(\vec{v}\cdot d\vec{\sigma}) + \frac{1}{2}g\oint_\sigma h^2 d\vec{\sigma} + g\iint_G h\nabla z_B\,dG + \frac{1}{2}\iint_G \lambda\vec{v}|\vec{v}|\,dG = \vec{0}; \quad (19)$$

$$\left(\iint_G h\,dG\right)_t + \oint_\sigma h(\vec{v}\cdot d\vec{\sigma}) = 0, \quad (20)$$

где

G – область течения в плане;

$h(\vec{r},t)$ – глубина потока;

$\vec{r}\{x,y\}$ – радиус-вектор в горизонтальной плоскости;

t – время;

$\vec{v}(\vec{r},t)$ – вектор средней по глубине скорости течения, лежащий в горизонтальной плоскости;

σ – граница области G ;

$d\vec{\sigma}=\vec{n}d\sigma$ – векторный элемент границы σ ;

$\vec{n}$ – единичный вектор внешней нормали к границе;

g – ускорение свободного падения;

$z_B(\vec{r})$ – поверхность дна;

$\nabla=\left\{\frac{\partial}{\partial x},\frac{\partial}{\partial y}\right\}$ – дифференциальный оператор Гамильтона, действующий в горизонтальной плоскости;

λ – коэффициент гидравлического трения, вычисляемый по формуле Маннинга $\lambda = 2gn^2h^{-1/3}$.

Граничные условия для наиболее характерного для нижних бьефов труб случая, когда число Фруда на выходе из трубы больше единицы ($Fr_{вых} > 1$) имеют вид:

$$\vec{v}=\vec{v}_{вых}\ ,\ h=h_{вых} \text{ на } \sigma_1;\quad v_n = 0 \text{ на } \sigma_2, \quad (21)$$

где σ_1 – часть границы σ, соответствующая выходному отверстию трубы;

G_2 – твердые (непроницаемые) стенки или берега лога;

v_n – нормальная к границе компонента скорости.

2.14. Система уравнений (19), (20) с граничными условиями (21) решается численно методом конечных разностей на регулярной сетке, состоящей из прямоугольных или выпуклых четырехугольных ячеек. Применяются схемы сквозного счета первого и второго порядков точности, основанные на использовании аналитического решения задачи о распаде гидродинамического разрыва [5-8]:

$$\Delta G(\hat{h}_0 - h_0)/\tau + \sum_{i=1}^{4} h_i(\vec{v}_i \vec{G}_i) = 0; \qquad (22)$$

$$\Delta G[(h\hat{\vec{v}})_0 - (h\vec{v})_0]/\tau + \sum_{i=1}^{4} (h\vec{v})_i(\vec{v}_i \vec{G}_i) + \frac{1}{2} g \sum_{i=1}^{4} h_i^2 \vec{G}_i + f_в + g n^2 (\hat{h}\hat{\vec{v}})_0 |\vec{v}| \hat{h}_0^{-4/3} = 0 \qquad (23)$$

Схемы (22), (23) записаны для произвольной четырехугольной ячейки. Нижним индексом "0" отмечены сеточные величины, отнесенные к центру ячейки, индексом i – величины, отнесенные к i-й стороне ячейки ($i = 1, 2, 3, 4$). Символом "$\wedge$" обозначены величины на верхнем и нижнем слоях по времени; τ – шаг по времени; ΔG – площадь ячейки; $f_в$ – аппроксимация члена $g \int\int_{\Delta G} h \nabla z_в dG$.

Способы вычисления величин $\vec{v}_i$, h_i, $f_в$ для схем первого и второго порядков точности, а также эффективные алгоритмы расчета распада гидродинамического разрыва подробно описаны в работах [5, 6, 8]. Там же рассмотрены вопросы постановки разностных аналогов граничных условий (21).

2.15. На основе разработанных алгоритмов в лаборатории мостовой гидравлики и гидрологии ЦНИИСа создана и эксплуатируется программа *WASSER* на языке Фортран для ЭВМ серии ЕС. Программа позволяет рассчитывать гидравлические характеристики потока в каждой точке укрепления при различных уклонах трубы и лога, различ-

ных коэффициентах шероховатости n и параметрах расхода ΠQ с учетом влияния формы воронки размыва и условий протекания в выходном логе. Примеры расчета нижнего бьефа по программе приведены в [6, 7], примеры расчета других гидравлических задач - в [5, 6]. Общая последовательность расчетов такова:

а) на плане нижнего бьефа водопропускной трубы строится разностная сетка, учитывающая реальные очертания выходного лога, расположение и диаметр трубы, длину и ширину укрепленной части, размеры воронки размыва;

б) в узлах сетки задаются реальные отметки дна на укреплении и в выходном логе (с учетом ямы размыва), а также коэффициенты шероховатости и начальные значения скорости и глубины в нижнем бьефе (обычно они принимаются бытовыми);

в) на сторонах элементов сетки, прилегающих к границам, задаются граничные условия (21);

г) производится расчет по программе до нахождения стационарного решения, когда поля скоростей и глубин на укреплении на нескольких последовательных шагах по времени практически совпадают. При определенных условиях стационарное решение может не существовать (сбойность течения). Тогда необходимо анализировать результаты на различные моменты времени.

Пример разностной сетки и результатов расчета по программе приведен в справочном приложении 4.

Расчет глубин, скоростей и ширины растекания потока на укреплении на основе эмпирических зависимостей

2.16. Гидравлические характеристики потока на укреплении при уклонах лога $i_л \leq 0,02$ определяют согласно Руководству [1].

Максимальную скорость на укреплении принимают

$$v_{max} = 1,2\, v_{вых}, \qquad (24)$$

где $v_{вых}$ – скорость на выходе из трубы (см. п. 2.11).

Средние глубины $h_{укр(к)}$ потока в конце укрепления длиной $L = (2 - 6)D_э$ вычисляют по формуле

$$h_{укр(к)} = 0,2 П_Q D_э . \qquad (25)$$

Ширину растекания потока на укреплении в створе, расположенном на расстоянии x от конца оголовка, находят по зависимости

$$B_{раст} = b\left[\left(\frac{x}{D_э} + 1\right)^S - 1\right] + b_р , \qquad (26)$$

где $b_р$ – ширина оголовка в конце его;

$$S = 1,8 \lg\left[\frac{1}{K} \frac{\Delta h_{max}}{D_э}\left(\frac{Q_к}{Q}\right)^{0,2}\right], \qquad (27)$$

где K – коэффициент формы воронки размыва, определяемый по графику рис. 4;

Δh_{max} – максимальная глубина размыва на данное время (см. разд. 3);

$Q_к = 0,51\sqrt{g}\, D_э^{5/2}$ – эталонный расход.

Приближенно в средних условиях показатель степени можно определять по формуле

$$S = 0,78 + 0,36 \lg \frac{Q_к}{Q}, \qquad (28)$$

полученной из (27) при $K = 0,8$ и $\Delta h_{max}/D_э = 2$.

2.17. Гидравлические характеристики потока на укреплении при уклонах лога $i_л > 0,02$ определяют по приводимым ниже формулам лишь при коэффициенте шероховатости укрепления $n_{укр} = 0,014 - 0,016$. В остальных случаях расчет следует проводить по программе, основанной на математической модели протекания (см.п.2.2).

Максимальную скорость на укреплении принимают

$$v_{max} = v_{вых} . \qquad (29)$$

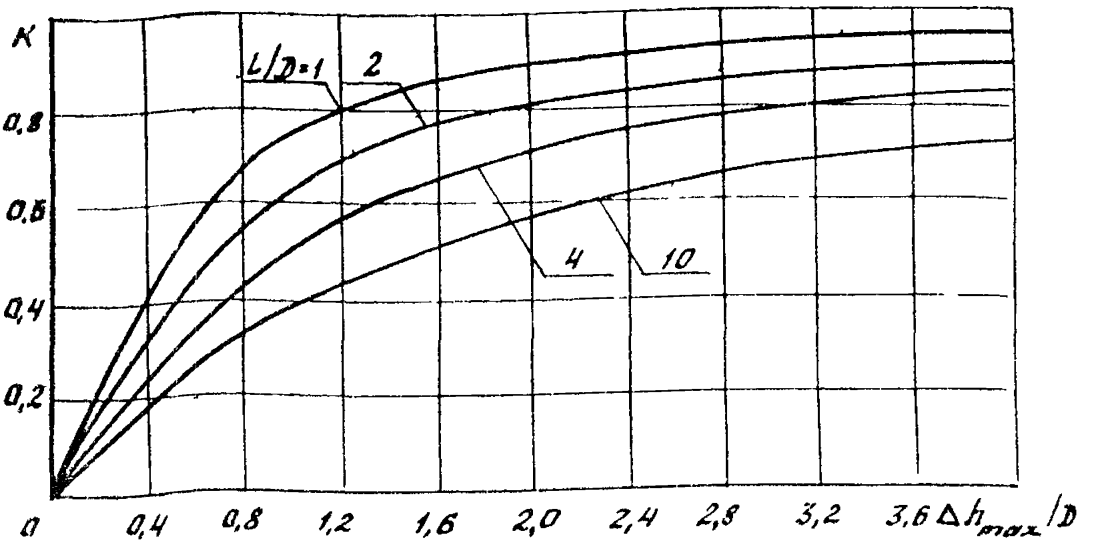


Рис. 4. График для определения коэффициента K формы воронки размыва

кости v на укреплении определяют по формуле

$$\frac{v}{v_{ось}} = exp\left[-(5,6 - 0,25\frac{x}{D_э})\left(\frac{y}{B'_{раст}}\right)^{2,25}\right] \qquad (30)$$

где y – расстояние от оси потока (середины укрепления) до данной точки;

$B'_{раст} = \frac{B_{раст}}{2}$ – половина ширины растекания;

$v_{ось}$ – скорость на оси потока на расстоянии x от конца оголовка.

Осевая скорость задается соотношением

$$\frac{v_{ось}}{v_{вых}} = exp\left[-0,004\left(\frac{x}{D_э}\right)^2\right] \qquad (31)$$

Формулами (30), (31) можно пользоваться в диапазоне $0 \leq x/D_э \leq 20$.

Глубины на укреплении при $0,5 \leq x/D_э \leq 20$ определяют по формулам

$$\frac{h}{h_{ось}} = \exp\left[-\frac{7.0\left(\frac{y}{B_{раст}} - 0.03\frac{x}{D_э}\right)}{\left(\frac{x}{D_э}+1\right)^{4/3}}\right] - 0.07\frac{x}{D_э}\left(\frac{y}{B_{раст}} - 0.7\right); \quad (32)$$

$$\frac{h_{ось}}{h_{вых}} = \sqrt{\frac{1.5\, i_л^{2/3}}{\frac{x}{D_э} + 1.5\, i_л^{2/3}}}. \quad (33)$$

Ширину растекания потока на укреплении определяют по формуле

$$B_{раст} = M\mathcal{N} + b_р. \quad (34)$$

Здесь M и $\mathcal{N}$ параметры, определяемые соотношениями:

$$M = \frac{26.5 D_э}{\sqrt[6]{i_т}} \sqrt[4]{\frac{g}{i_{укр} C_{укр}^2}} \sqrt[8]{\Pi_Q}; \quad (35)$$

$$\mathcal{N} = \exp\left(-\frac{1.75}{\Pi_Q^{0.22}\sqrt{x/D_э}}\right), \quad (36)$$

где $C_{укр}$ – коэффициент Шези на укреплении

$$C_{укр} = \frac{1}{n_{укр}} h_{укр}^{1/6}. \quad (37)$$

Здес $h_{укр}$ – средняя глубина потока в конце укрепления, принимаемая по формуле (25).

Для упрощения расчетов величины $v(x, y)$, $h(x, y)$ можно определять по графикам рекомендуемого приложения 5.

2 18. В выходных руслах с гасителями (п. 3.4) глубины, скорости и границы растекания потока определяют следующим образом:

а) при применении гасителей в виде ребра и стенки в раструбном оголовке (типы выходных русл 3 и 4) с некоторым приближением можно пользоваться рекомендациями для выходных русл без гасителей;

б) при применении гасителя в виде водобойной стенки характеристики на выходах из сооружений определяют в соответствии с методикой, изложенной в [1, гл. X]. С некоторым приближением для назначения типа укрепления можно принять расчетные скорости на укреплении равными 6 м/с при расчетном расходе и 8 м/с – при наибольшем. Ширину растекания на укреплении определяют по формулам [1, гл. X]. При гасителе в виде расширяющегося колодца с водобойной стенкой (тип 5)

$$B_{раст} = 2b_p\left\{1+0{,}55\lg\left[\frac{x}{b_p}(1-i_г)+0{,}123\right]\right\}; \quad (38)$$

при гасителе с двумя водобойными стенками (гаситель ЦНИИС, тип 6)

$$B_{раст} = b_p\left\{2{,}52+2{,}18\lg\left[\frac{x}{b_p}(1-i_г)+0{,}20\right]\right\}, \quad (39)$$

где b_p – ширина выхода из гасителя;
$i_г$ – уклон дна гасителя.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ДНА В НИЖНИХ БЬЕФАХ ТРУБ

Характер деформаций и режимы протекания в размываемом логе

3.1. Поток, попадая с укрепления на размываемый грунт лога, образует в нем воронку, приближенно имеющую в плане форму эллипса, в пространстве – форму эллиптического конуса (рис. 5, а). Высота этого конуса, равная максимальной глубине размыва Δh_{max} за данное время, зависит от уклона, формы и размеров трубы; величины и продолжительности паводка; уклона, формы и характеристик грунтов лога. С увеличением продолжи-

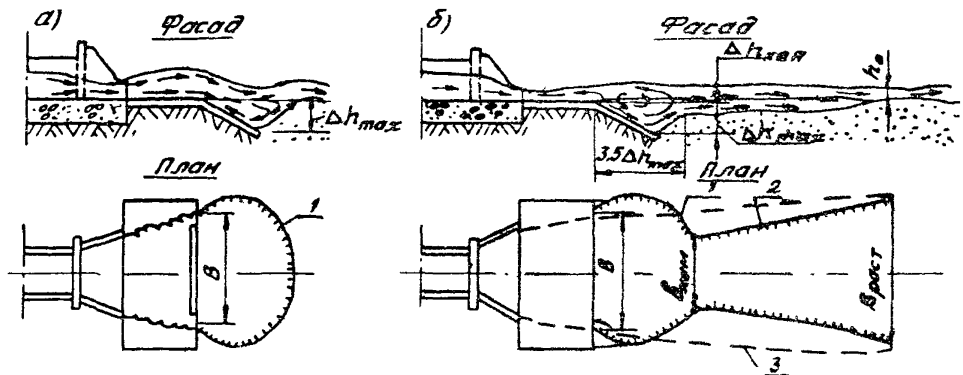


Рис. 5. Характер деформаций и режимы протекания в нижних бьефах труб:
а - поверхностный; б - донный; 1 - контур воронки размыва; 2 - контур канавы;
3- границы растекания

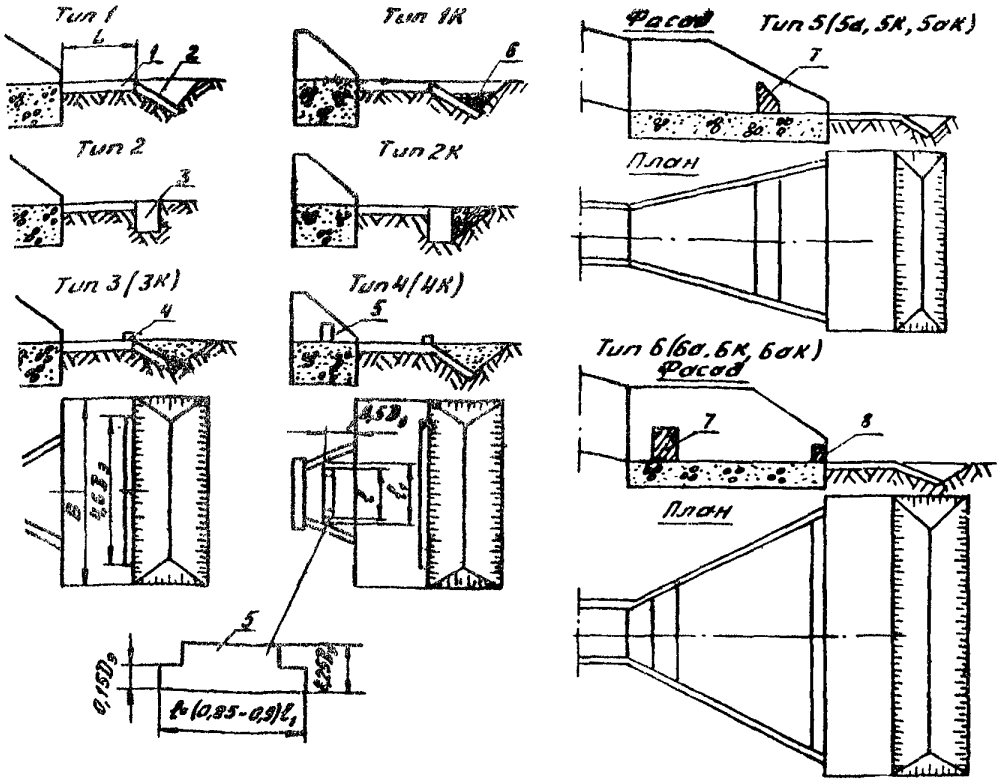


Рис. 6. Типы выходных русл:
репление; 2 – предохранительный откос; 3 – вертикальная стенка; 4 –
в конце укрепления; 5 – стенка в раструбе; 6 – каменная наброска;
енка в расширяющемся раструбе; 8 – стенка на выходе из расширяю-
шегося раструба

тельности паводка $\Delta h_{уд}$ возрастает, достигая своей предельной величины $\Delta h_{пр}$ лишь за бесконечно большое время.

В настоящих Методических рекомендациях Δh_{max} является основной расчетной величиной, определяющей тип и размеры укреплений, а $\Delta h_{пр}$ используется как параметр в формуле для нахождения Δh_{max}.

3.2. В ряде случаев при уклонах лога $i_л > 0,02$ за воронкой размыва ниже по течению возможно образование промоины (канавы), которое приводит к увеличению глубины размыва на величину, равную глубине канавы на ее входе (рис. 5, б). В зависимости от гидравлических характеристик потока, уклона и грунтов лога промоина может иметь либо ограниченный характер, либо развиваться на всем протяжении лога. В последнем случае необходимы специальные меры защиты, так как это угрожает сохранности водопропускного сооружения.

3.3. В воронке размыва возможны два режима протекания потока - поверхностный (см. рис. 5, а) и донный (см. рис. 5, б).

Донный режим характеризуется наличием поверхностного гидравлического прыжка и донного транзитного потока. Глубина размыва при этом режиме наибольшая.

Поверхностный режим характеризуется наличием донного вальца и поверхностного транзитного потока. Размыв при этом режиме существенно (в 1,5 - 2 раза) меньше, чем при донном. Устойчивый поверхностный режим может быть обеспечен лишь специальными устройствами, к числу которых относится ребро в конце укрепления и гасители.

3.4. Для защиты нижнего бьефа от размывов рекомендуются следующие 6 основных типов выходных русл (рис. 6). Тип 1 представляет собой укрепление с концевой частью в виде предохранительного откоса, тип 2 - то же с вертикальной стенкой. Тип 3 отличается от типа 1 наличием ребра в конце укрепления, тип 4 - сочетанием стенки в раструбном оголовке с ребром в конце укрепле-

ния. Тип 5 представляет собой расширяющийся водобойный колодец с одной стенкой, а тип 6 – с двумя стенками (гаситель ЦНИИС). Типы 5а, 6а отличаются от типов 5, 6 наличием вертикальной стенки вместо предохранительного откоса.

Во всех типах выходных русл эффективно применение каменной наброски в концевых частях. Соответствующие номера типов выходных русл помечены индексом "к".

Типы 5 (5а, 5ак) и 6 (6а и 6ак), как правило, используют для труб, укладываемых с большими уклонами (косогорных). Геометрические размеры и гидравлические характеристики в нижних бьефах труб с выходными руслами этих типов определяют в соответствии с рекомендациями, изложенными в Руководстве [1, гл. X].

Максимальные глубины размыва

3.5. Максимальные глубины размыва при уклонах лога $i_л \leq 0,02$ определяют по формулам:

а) в выходных руслах без каменной наброски

$$\Delta h_{max} = \Delta h_{пр}\,\eta\ ; \qquad (40)$$

б) в выходных руслах с каменной наброской

$$\Delta h_{max(н)} = \Delta h_{пр}\left(\frac{d}{d_н}\right)^{1/3} + A\,d_н\,\frac{\Delta h^2_{max}}{\bar{W}_к}\ , \qquad (41)$$

где $\Delta h_{пр}$ и Δh_{max} – соответственно предельная и максимальная глубины размыва в заданном выходном русле при отсутствии каменной наброски; ($\Delta h_{пр}$ см. п.3.7);

η – коэффициент, учитывающий время прохождения паводка (см. п 3.9);

$\bar{W}_к$ – удельный объем каменной наброски на единицу ширины укрепления со средним диаметром камня $d_н$:

A – коэффициент, принимаемый в выходных руслах с вертикальной стенкой или предохранительным откосом в конце укрепления равным 0,13, в выходных руслах без них – 0,5;

d – расчетный диаметр частиц грунта (см. п.3.8).

Для эффективной работы камня в наброске объем его следует задавать в пределах $\bar{W}_{к(min)} < \bar{W}_к < \bar{W}_{к(max)}$, а крупность – не менее полученной из выражения

$$d_н \geq d^{1/4}\left[\frac{\Delta h_{пр}}{10 - A\frac{\Delta h^2_{max}}{\bar{W}_к}}\right]^{3/4} \qquad (42)$$

Минимальный $\bar{W}_{к(min)}$ и максимальный $\bar{W}_{к(max)}$ удельные объемы камня определяют по формулам

$$\bar{W}_{к(min)} = A d_н \frac{\Delta h_{max}}{1-\left(\frac{d}{d_н}\right)^{1/3}\frac{1}{n}}, \qquad (43)$$

$$\bar{W}_{к(max)} = 1{,}4\left(D_э \frac{Q}{Q_к}\right)^2. \qquad (44)$$

При $\bar{W}_к < \bar{W}_{к(min)}$ расчет размыва следует производить без учета наброски.

При $\bar{W}_к \geq \bar{W}_{к(max)}$ глубину размыва определяют по формуле

$$\Delta h_{max(н)} = \left[\Delta h_{пр}\left(\frac{d}{d_н}\right)^{1/3} + A\frac{\Delta h^2_{max}}{\bar{W}_к}\right]\left(\frac{\bar{W}_{к(max)}}{\bar{W}_к}\right)^{0,5} \qquad (45)$$

3.6. Максимальные глубины размыва при уклонах лога $i_л > 0{,}02$ определяют по формулам:

а) в выходных руслах без каменной наброски

$$\Delta h'_{max} = \Delta h_{max} + \Delta h_{кан}; \qquad (46)$$

б) в выходных руслах с каменной наброской

$$\Delta h'_{max(н)} = \Delta h_{max(н)} + \Delta h_{кан}, \qquad (47)$$

где $\Delta h_{кан}$ – глубины размыва выходного лога за счет возможного образования промоины (канавы) в ее начале (см. пп.3.10–3.14).

При $i_л > 0,02$ минимальный объем камня в рисберме определяют по формуле (43); поправку на избыток камня не вводят.

3.7. Предельные глубины размыва определяют по формуле

$$\Delta h_{пр} = \tau \delta_м \Psi D_э \left(\frac{Q}{Q_к}\right)^{S} \left[\frac{D_э^3}{(\mathcal{L}/D_э + 1)\, b\, B_р d}\right]^{0,2}, \quad (48)$$

где Q – максимальный расход регламентируемого нормами паводка (расчетного или наибольшего);

$\mathcal{L}$ – длина укрепления, м;

b – ширина отверстия, равная наибольшему горизонтальному размеру поперечного сечения сооружения, м;

$\delta_м = 0,85 \left(\frac{D_o}{D_э}\right)^{0,075}$ – масштабный коэффициент;

$D_o = 1$ м;

Ψ – коэффициент, учитывающий тип концевой части выходных русл; при наличии предохранительного откоса $\Psi = 1$, при наличии вертикальной стенки $\Psi = 0,6$, для выходных русл с ребром $\Psi = 1$ независимо от наличия стенки;

τ, S – коэффициент и показатель степени, значения которых для различных типов выходных русл приведены в табл. 4.

Таблица 4

Тип выходного русла	Коэффициент τ	Показатель степени S	Относительный граничный расход $(Q/Q_к)_{гр}$
1, 1к	0,9	0,6	Без ограничений
2, 2к	0,9	0,6	То же
3, 3к	0,6	0,4	1,0
4, 4к, 5, 5к, 5а, 5ак	1,0	1,0	0,5
6, 6к, 6а, 6ак	1,0	1,0	0,3

В последнем столбце табл. 4 выписаны граничные значения $(Q/Q_к)_{гр}$, при превышении которых в формулу (48) вместо $Q/Q_к$ должны подставляться эти значения.

3.8. При расчете размывов грунты в логе подразделяются на связные и несвязные. К несвязным грунтам относятся крупнообломочные и песчаные грунты, не обладающие свойством пластичности (раскатывания).

К связным относятся глинистые, суглинистые и супесчаные грунты с числом пластичности более 0,01, а также глинистые и песчаные грунты при степени заторфованности (содержании растительных остатков) более 10 %.

Расчетный диаметр частиц однородного несвязного грунта определяют по формуле

$$d = \frac{\Sigma d_i P_i}{100}, \qquad (49)$$

где P_i – содержание по массе в процентах i-й фракции со средним диаметром частиц d_i.

К однородным несвязным следует относить грунты, удовлетворяющие условию $\frac{d_{max}}{d} \leq 3$, где d_{max} – средний диаметр крупных частиц, которые составляют 5 % от массы грунта или диаметр самой крупной фракции, если она составляет не менее 5 % от массы грунта.

Расчетный диаметр связного грунта d, мм, определяют по формуле

$$d = 10(0.15 + 10^{-4} C_p), \qquad (50)$$

где C_p – расчетное сцепление, Па, которое определяют на основании стандартных методов испытаний образцов в состоянии капиллярного водонасыщения при полной влагоемкости с учетом возможного (вероятного) отклонения значения сил сцепления от нормативных; для предварительных расчетов значение C_p для глинистых грунтов можно принимать по данным СНиП 2.02.01-83 [9], а для торфов – по табл.5.

Таблица 5

Характеристика заторфованного грунта		Расчетное сцепление C_p, кгс/см^2 = 10^5 Па
Содержание растительных остатков в грунте %	Вид торфа	
> 60	Древесный	0,005
	Хвощевый	0,025
60-40	Осоковогипновый	0,025
	Сфагновый	0,04
40-25	Осоковогипновый	0,075
	Сфагновый	0,10

При наличии в логе засоленных и мерзлых[1] связных грунтов расчетный их диаметр определяют по формуле (50) с введением в нее коэффициента $\beta = \beta_t \beta_c$

Коэффициент β_t принимают по табл. 6 в зависимости от состава породы и содержания льда, которые определяют криогенную текстуру, т.е. совокупность признаков сложения мерзлого грунта, обусловленную ориентировкой, относительным расположением и распределением различных по форме и размерам ледяных включений и льда-цемента.

Таблица 6

Криогенная структура	Содержание льда, %	Коэффициент β_t
Атакситовая	> 50	0-0,12
Сетчатая	50 - 30	0,12-0,25
Слоистая	40 - 25	0,25-1
Массивная и корковая для сыпучемерзлых грунтов	< 25	1

При содержании легкорастворимых солей до 3 % коэффициент принимают по табл. 7.

[1] Под мерзлыми понимают грунты, в которых после промерзания (при оттаивании) нарушены структурные связи

Таблица 7

Расчетное сцепление $C_р$, 10^5·Па	≤0,005	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,075	≥0,1
Коэффициент β_c	0,85	0,80	0,64	0,56	0,52	0,45	0,40	0,35

При бóльшем содержании солей в грунте коэффициент β_c устанавливается на основании специальных исследований.

Для несвязных грунтов температурный режим не оказывает влияния на их размываемость и поэтому следует принимать $\beta_t = 1$. При содержании в несвязных грунтах легкорастворимых солей средний диаметр частиц определяют по формуле (49) с коэффициентом 0,85.

3.9. Коэффициент η в формуле (40) при пропуске постоянного расхода Q в течение времени t рассчитывают по формулам:

$$\eta = 1 - \frac{1}{3\sqrt{t/t_0}+1}; \qquad (51)$$

$$t_0 = 540\left(\frac{Q}{Q_к}\right)^{0,25}\left[\frac{\Delta h_{пр}^3}{Q} + \frac{11}{Q}\left(10^{-4}C_р\right)^3\right], \qquad (52)$$

причем в случае наличия гасителей граничные значения $Q/Q_к$ определяют по табл. 4 (см. п.3.7).

Для реальных гидрографов, форма которых регламентирована [10] (показательного, треугольного, трапециевидного), расчетное время определяется зависимостью

$$t = 0.5\,W/Q, \qquad (53)$$

где W – обьем стока за время паводка.

Для более точного учета фактора времени, особенно при гидрографах сложной формы (многопиковых и т.п.),

рекомендуется пользоваться методикой расчета, изложенной в рекомендованном приложении 6.

Для определения величины η наряду с формулой (51) можно пользоваться графиком (рис. 7).

Глубина промоины в выходном логе

3.10. Глубину промоины определяют в такой последовательности.

Вычисляют ширину потока $B_{нр}$ при которой скорость в логе равна неразмывающей

$$B_{нр} = \frac{Q\, c_л^{3/2}}{v_н^{5/2}\, n_л^{3/2}}, \qquad (54)$$

Здесь для одернованных логов принимают $v_н = 1{,}5$ м/с, а во всех остальных случаях

$$v_н = 2{,}1\sqrt{g d}, \qquad (55)$$

где d – эквивалентный диаметр грунта лога (см.п.3.8).

Величину $B_{нр}$ сравнивают с шириной лога $b_л$ (для явно выраженного лога) либо с предельной шириной растекания потока на наклонной плоскости

$$B_{раст(пр)} = M + b_р, \qquad (56)$$

где M находят по формуле (35) или по зависимостям рекомендованного приложения 5 (с заменой $i_{укр}$ и $C_{укр}$ на $i_л$ и $C_л$).

Если $B_{нр} > b_л$ либо $B_{нр} > B_{раст(пр)}$, то размыв дна лога может происходить на большой длине и сопровождаться значительным понижением отметок, в том числе и у концевой части укрепления. В этом случае необходимо принимать специальные меры защиты: устраивать перепады, укреплять лог до его подошвы или на значительном протяжении.

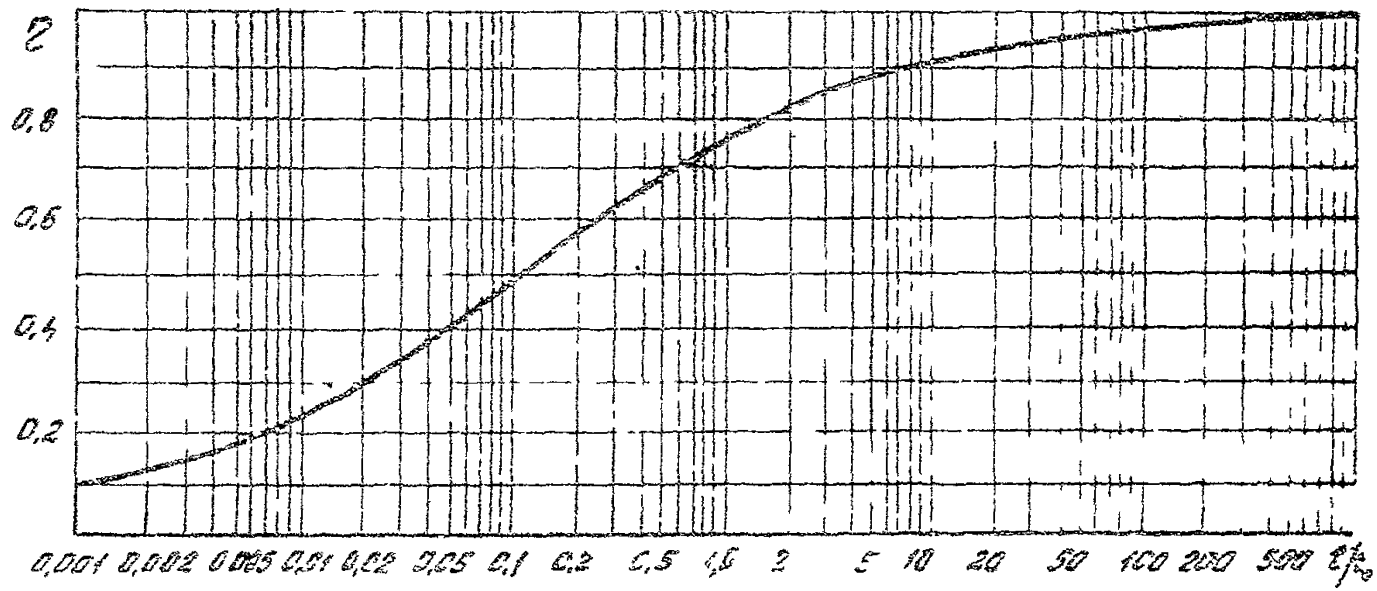


Рис. 7. График для определения относительной глубины размыва

В противном случае определяют положение створа $x = X_{нр}$, в котором прекращается размыв, и глубину потока в нем – по формулам:

$$X_{нр} = \frac{0{,}57 D_э}{\Pi_Q^{0{,}44} i_д^2 N}; \qquad (57)$$

$$h_{нр} = \left(\frac{Q n_л}{B_{раст(пр)} \sqrt{i_л}} \right)^{3/5}, \qquad (58)$$

где величину N определяют из формулы (34), приняв $B_{раст} = B_{нр}$

$$N = \frac{B_{нр} - b_р}{M} \qquad (59)$$

Вместо формулы (57) можно использовать график рис. 2 рекомендуемого приложения 5.

3.11. Производят расчет параметров (ширины и глубины потока) на входе в канаву. Вначале определяют максимальную глубину размыва Δh_{max} для случая отсутствия промоины (канавы) по формуле (40). Затем находят (в первом приближении) расстояние от выхода из трубы до входа в канаву

$$X_{кан} = \mathcal{L} + (2 + m) \Delta h_{max} (1 - m i_л), \qquad (60)$$

где m – коэффициент заложения откоса укрепления. Если $X_{кан} > X_{нр}$, то полагают $\Delta h_{кан} = 0$.

Вычисляют ширину растекания $B_{раст(кан)}$ в створе начала канавы $B_{раст(кан)} = B_{раст}(X_{кан})$ по формулам (34) – (36).

Находят ширину $b_{кан}$ и глубину $h_{кан}$ потока на входе в канаву при стабилизации размыва:

$$b_{кан} = \frac{35 Q^{0{,}128} i_л^{0{,}343}}{d^{0{,}32} g^{0{,}264}}; \qquad (61)$$

$$h_{кан} = \left(\frac{Q}{1.15\sqrt{g}\, d^{1/4} b_{кан}} \right)^{4/5}. \qquad (62)$$

Если $B_{раст(кан)} < b_{кан}$, то принимают $b_{кан} = B_{раст(кан)}$, а $h_{кан}$ вычисляют по формуле (62), в противном случае к расчету принимают $b_{кан}$ и $h_{кан}$, вычисленные по формулам (61) и (62).

3.12. Определяют среднюю глубину потока в канаве

$$h_{кан(ср)} = \frac{1}{2}(h_{кан} + h_{нр}). \qquad (63)$$

3.13. Определяют глубину размыва канавы по формуле

$$\Delta h_{кан} = (X_{нр} - X_{кан})\left(i_л - \frac{v_0^3}{C^2 Q}\,\frac{B_{нр} + b_{кан}}{2}\right) + h_{кан} - h_{нр}, \qquad (64)$$

где коэффициент Шези C определяют при $h = h_{кан(ср)}$ по формуле

$$C = \frac{1}{n} h_{кан(ср)}^{1/6}. \qquad (65)$$

3.14. Определяют уточненное расстояние от выхода из трубы до входа в канаву

$$X'_{кан} = X_{кан} + \frac{m\Delta h_{кан}}{1 - m i_л} \qquad (66)$$

Если $(X'_{кан} - X_{кан}) / X'_{кан} > 0{,}3$, то заменяют $X_{кан}$ на $X'_{кан}$ и производят повторный расчет канавы.

Если $\Delta h_{кан} > 3$ м, то либо увеличивают отверстие сооружения, либо принимают специальные меры защиты (устраивают перепады консольные сбросы и т.п.).

4. НАЗНАЧЕНИЕ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ ВЫХОДНЫХ РУСЛ

4.1. Исходными данными для назначения основных размеров выходных русл являются гидравлические харак-

теристики потока в нижнем бьефе (глубины, скорости и границы растекания) и глубины размыва. В результате расчетов определяют длину и ширину укрепления на выходе из трубы, глубину заложения концевой части, мероприятия по уменьшению размывов за укреплением (гасители, размер каменной рисбермы и т.д.).

4.2. Расчет основных размеров выходных русл выполняют в такой последовательности:

1. Предварительно назначают тип выходного русла из числа рекомендованных (см.рис.8), исходя из следующих соображений:

а) для полностью загруженных труб (т.е. работающих при расчетных заполнениях) рекомендуются типы 1к и 2к, причем при значительных уклонах сооружений $i_т > 0,04$ применяют ступенчатую укладку звеньев труб;

б) для недогруженных труб применяют типы 1 или 2;

в) в качестве вариантов для труб при расчетном заполнении и особенно при больших уклонах труб и лога ($i_т$ и $i_л$ больших 0,05) применяют типы 3 (3к) – 4 (4к) и 5 (5а, 5к, 5ак), 6 (6а, 6к, 6ак), рассматривая при этом случай укладки труб без ступеней.

2. Определяют глубины и скорости потока на выходе из труб и на укреплении согласно рекомендациям разд.2.

3. Назначают тип и длину укреплений, принимая ее равной (из конструктивных соображений) $\mathcal{L} = (1,5-2)$.

4. Определяют глубину размыва на выходе из труб. При глубине размыва $\Delta h_{max} > 2$ м переходят на другой тип выходного русла, обеспечивающий снижение размыва, и расчет повторяют. При $\Delta h_{кон} > 3$ м увеличивают отверстие сооружения либо принимают специальные меры защиты.

5. Определяют глубину заделки концевой части.

6. Определяют ширину растекания потока.

7. Определяют ширину укреплений и устанавливают их окончательные размеры.

8. При использовании выходных русл типов 5 (5а) и 6 (6а) определяют размеры гасителей согласно Руководству [1, гл. X].

4.3. Тип и материал укреплений устанавливают по величине максимальной скорости на укреплении, сравнивая ее с допускаемыми скоростями для укреплений, приведенными в [1, табл. П-6, стр. 28].

4.4. Глубину заложения концевой части укрепления определяют по формуле

$$\Delta h_{укр} = \frac{\Delta h_{max}(1+2i_л)+\Delta h_{кан}}{1-m i_л}, \qquad (67)$$

где m – коэффициент заложения откоса (для вертикальной стенки $m = 0$); в качестве искомой выбирают максимальную из двух глубин $\Delta h_{укр}$ при наибольшем расходе и при расчетном, причем последнюю величину умножают (для обеспечения необходимого запаса) на коэффициент 1,2, при $\Delta h_{укр} > 3,5$ изменяют тип выходных русл.

4.5. Ширину растекания потока при уклонах лога $i_л \leq 0,02$ определяют по формуле (26), при $i_л > 0,02$ – по формуле (34) либо по графикам приведенным в рекомендуемом приложении 5, либо по программе *WASSER* (п.2.12-2.15).

4.6. Ширину укрепления на всей длине, за исключением концевой части (длину ее принимают равной 1 м), устанавливают по ширине растекания потока с запасом в 1 м в каждую сторону.

Допускается уменьшать ширину укрепления из жестких бетонных элементов, ограничив ее либо изолиниями скоростей на укреплении, равных допускаемым скоростям для грунтов выходного лога, либо заменив часть укрепления наброской из щебня или камня определенной крупности на участке, где скорости потока не превышают допускаемых для указанного материала. Такое сокращение ширины укрепления допускается на всей длине его, за исключением концевой части.

В качестве расчетной ширины укрепления в концевой его части принимают большую из величин ширину растекания $B_{расч}$ в конце укрепления и $3m_{in}$, определяемую по формуле

$$B_{min} = \frac{\theta}{K} \Delta h'_{max} = \frac{\theta}{K}(\Delta h_{max} + \Delta h_{кан}), \qquad (68)$$

где B_{min} – минимальная ширина укрепления, соответствующая ширине воронки размыва в створе конца укрепления;

K – коэффициент формы воронки размыва (см. рис. 4);

θ – коэффициент, $\theta = 3$ при предохранительном откосе и $\theta = 3,6$ – при концевой части в виде вертикальной стенки.

После назначения ширины укрепления производят окончательную ее корректировку. Форма укрепления в плане может быть прямоугольной или трапецеидальной, причем с прямоугольными или ступенчатыми границами.

4.7. В выходных руслах с каменной наброской камень укладывают по всей ширине укрепления в приготовленный котлован так, чтобы верх его находился не менее чем на 0,5 м ниже поверхности земли. При уклонах лога $i_л \geqslant 0,02$ и возможности образования промоины в выходном логе камень следует укладывать на 0,5 м ниже дна промоины у концевой части.

При назначении удельного объема камня в рисберме следует учесть, что за счет его варьирования можно существенно сократить глубину размыва.

4.8. Рациональные типы и размеры укреплений выбирают на основе технико-экономического сравнения вариантов выходных русл.

4.9. Примеры расчетов основных размеров выходных русл приведены в рекомендуемом приложении 7.

Приложение 1
Рекомендуемое

ГРАФИКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛУБИН НА ВЫХОДЕ ИЗ ТРУБ $h_{вых}$ И КРИТИЧЕСКИХ ГЛУБИН $h_к$ В ТРУБАХ

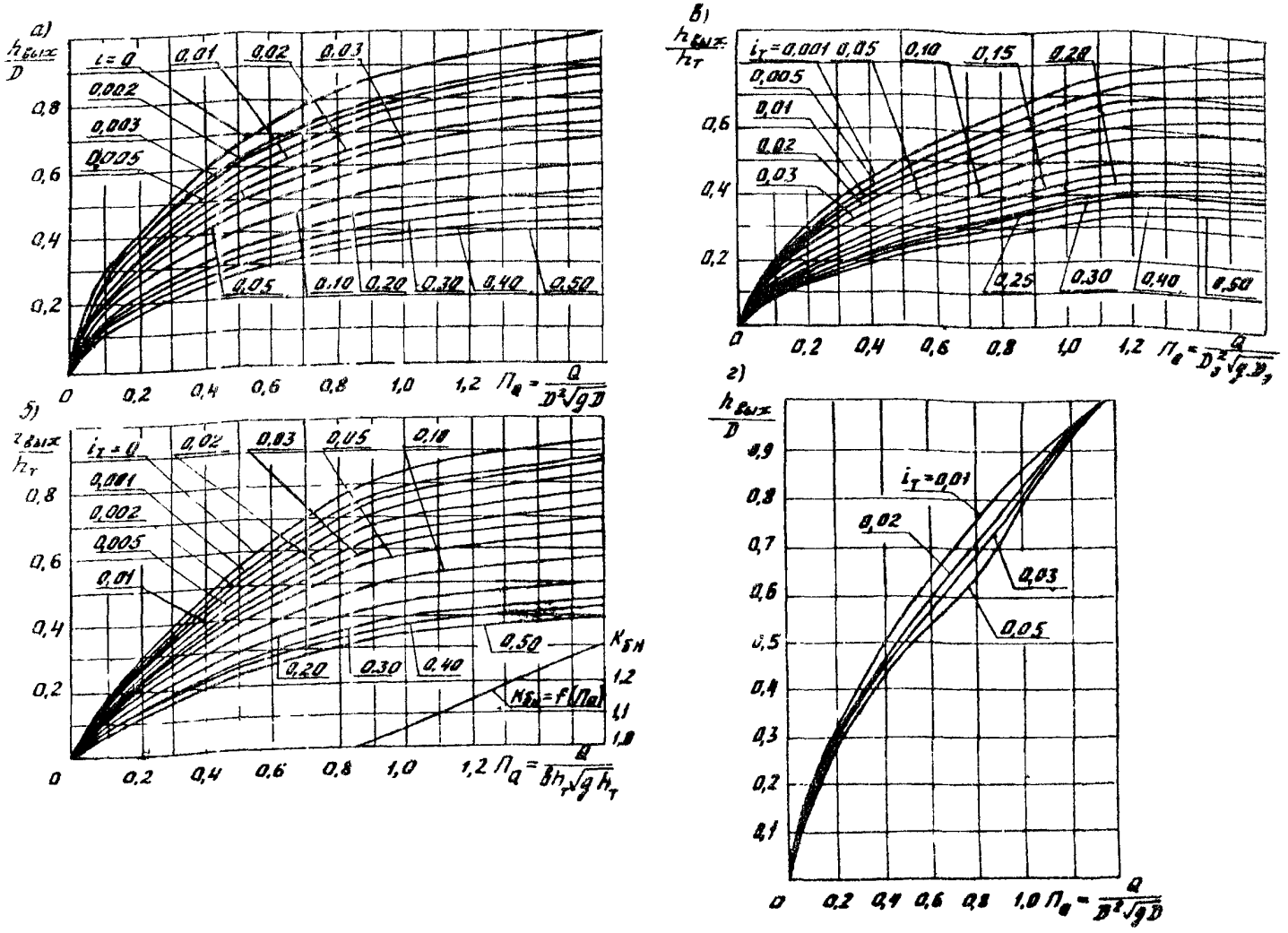


Рис. 1. График для определения глубин на выходе из труб:
а – круглых; б – прямоугольных, работающих при $\Pi_Q > 0{,}8$ при полунапорном режиме; в – овоидальных; г – гофрированных с учетом их возможной " зарядки"

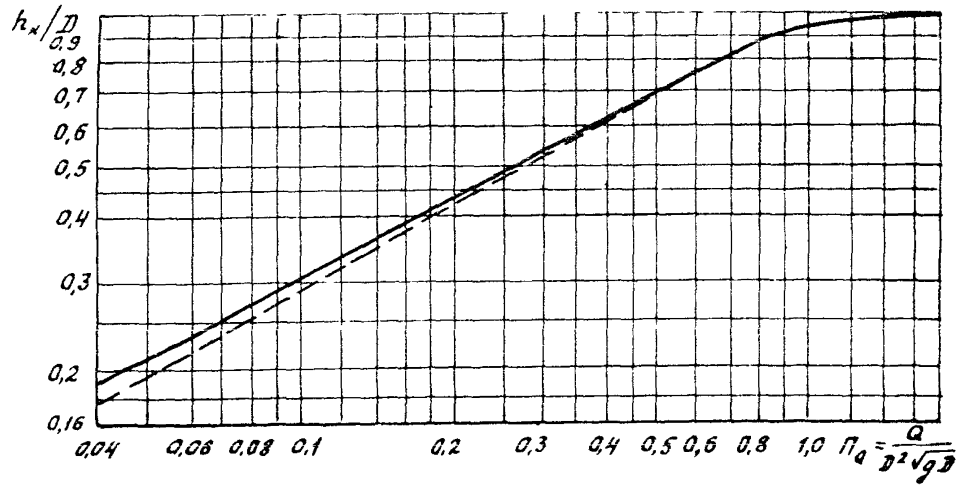


Рис. 2. График для определения критической глубины в трубах: ——— – круглых; – – – – овоидальных

Приложение 2
Рекомендуемое

ГРАФИКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НОРМАЛЬНЫХ ГЛУБИН h_0 В ТЕХНИЧЕСКИ ГЛАДКИХ ТРУБАХ

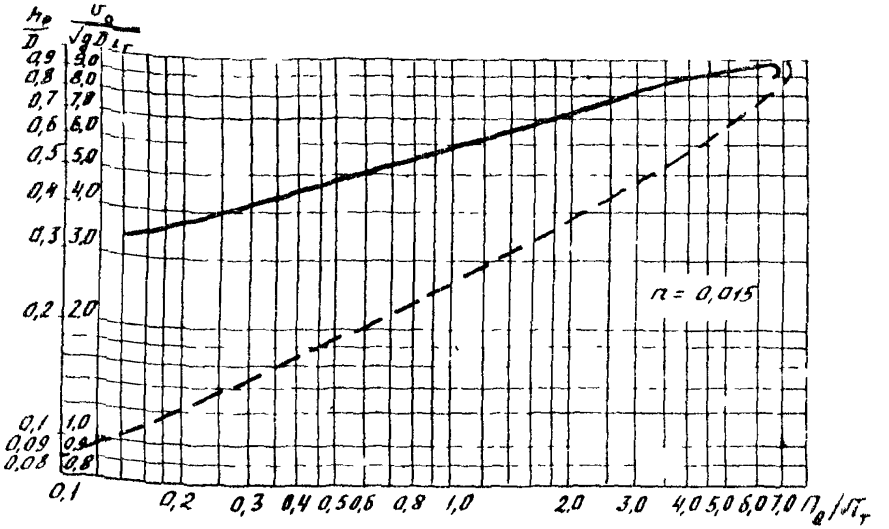


Рис. 1. Графики для определения нормальных глубин h_0 и соответствующих им скоростей v_0 в круглых трубах: ——— – для $v_0/\sqrt{gDi_T}$:– – — – для h_0/D

1. Пояснения к пользованию графиком (см.рис.1).

При коэффициенте шероховатости n, отличном от $n = 0,015$, относительные нормальные глубины в круглых трубах определяют при параметре расхода, приведенном к фактическому значению n

$$\Pi_Q = \Pi_Q \frac{n}{0,015}.$$

2. Пример расчета. Дано $D = 1$ м; $Q = 1,4$ м^3/с; $i_r = 0,15$; $n = 0,013$.

Расчет: $\Pi_Q = \frac{Q}{D^2\sqrt{gD}} = \frac{1,4}{1,0\sqrt{9,81 \cdot 1,0}} = 0,45$; $\Pi'_Q = \Pi_Q \frac{n}{0,015} = 0,45 \frac{0,013}{0,015} = 0,39$;

$$\frac{\Pi'_Q}{\sqrt{i_r}} = \frac{0,39}{0,15} = 1,00.$$

По графику находим $\frac{h_0}{D} = 0,26$, $h_0 = 0,26 \cdot 1,0 = 0,26$ м и $\frac{v_0}{\sqrt{gDi_r}} = 6,0$, $v_0 = 6,0\sqrt{9,81 \cdot 1,0 \cdot 0,15} = 7,3$ м/с.

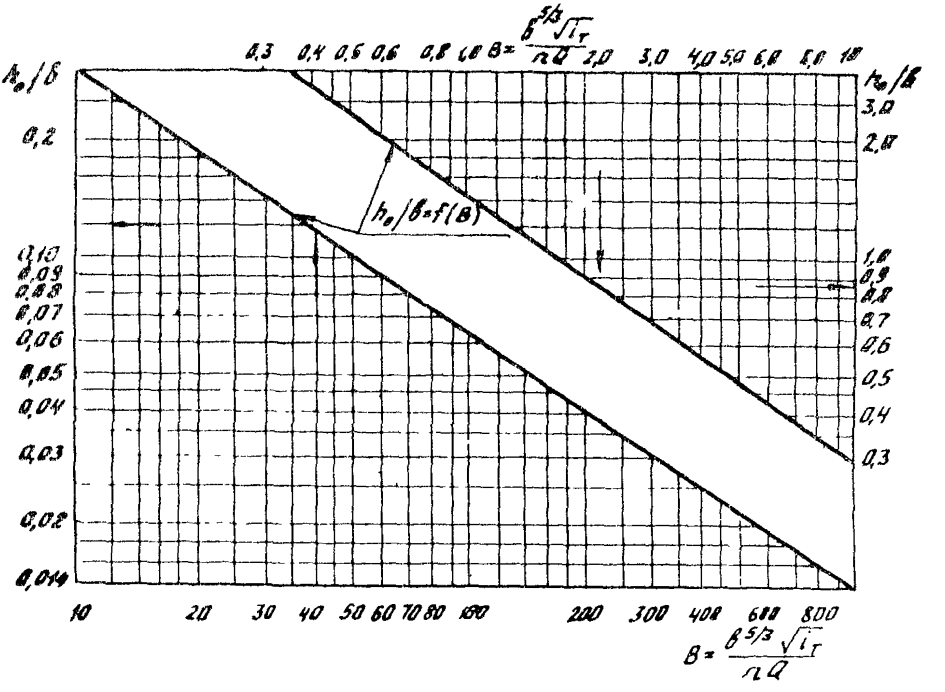


Рис. 2. График для определения нормальных глубин в прямоугольных трубах

Пример расчета (см.рис.2). Дано: $b = 2,0$ м, $n = 0,015$, $Q = 12,6$ м^3/с; $i_т = 0,10$.

Расчет: $K_0 = \frac{Q}{\sqrt{i_т}} = \frac{12,6}{0,10} = 40$; $b^{2,67} = 2^{2,67} = 6,36$;

$B = \frac{b^{2,67}}{nK_0} = \frac{6,36}{0,015 \cdot 40} = 106$ и по нижней и левой части графика находим $\frac{h_0}{b} = 0,63$ и $h_0 = 0,63 \cdot 2 = 1,26$ м.

Приложение 3
Рекомендуемое

ГРАФИКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТЕЙ НА ВЫХОДЕ ИЗ КРУГЛЫХ ТРУБ

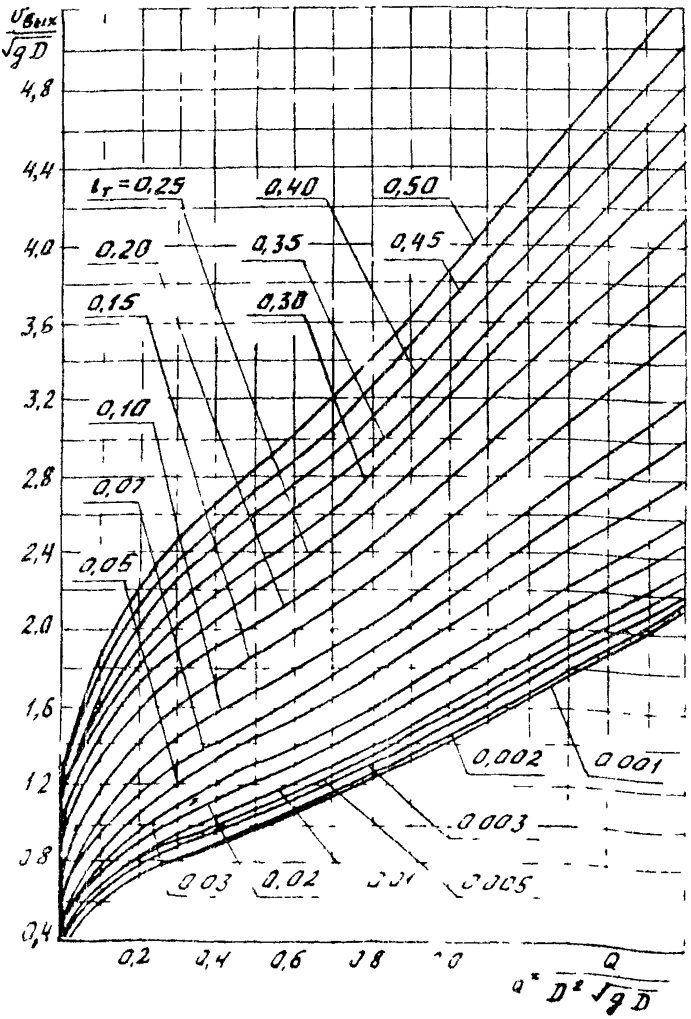


Рис. 1. График для определения скоростей на выходе из круглых технически гладких труб

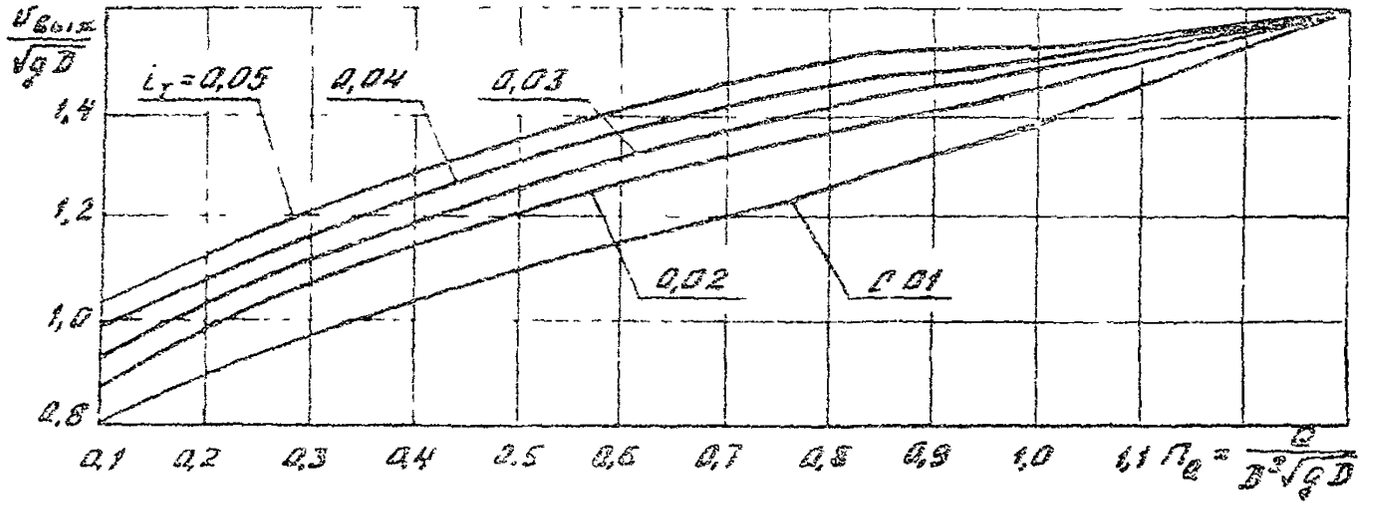


Рис. 2. График для определения скоростей на выходе $v_{вых}$ из гофрированных труб с учетом возможной их зарядки

Приложение 4
Справочное

РАЗНОСТНАЯ СЕТКА И ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКА В НИЖНЕМ БЬЕФЕ ВОДОПРОПУСКНОЙ ТРУБЫ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

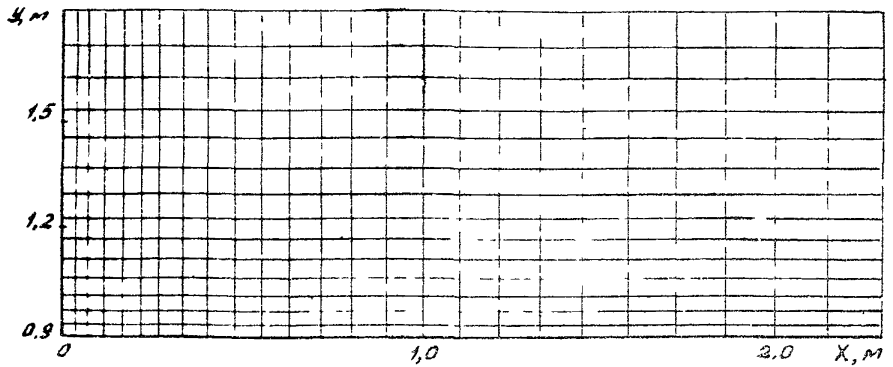


Рис. I. Вариант неравномерной разностной сетки для расчета растекания потока в логе с прямолинейными боковыми стенками (в силу симметрии области течения относительно оси трубы сетка построена для половины области)

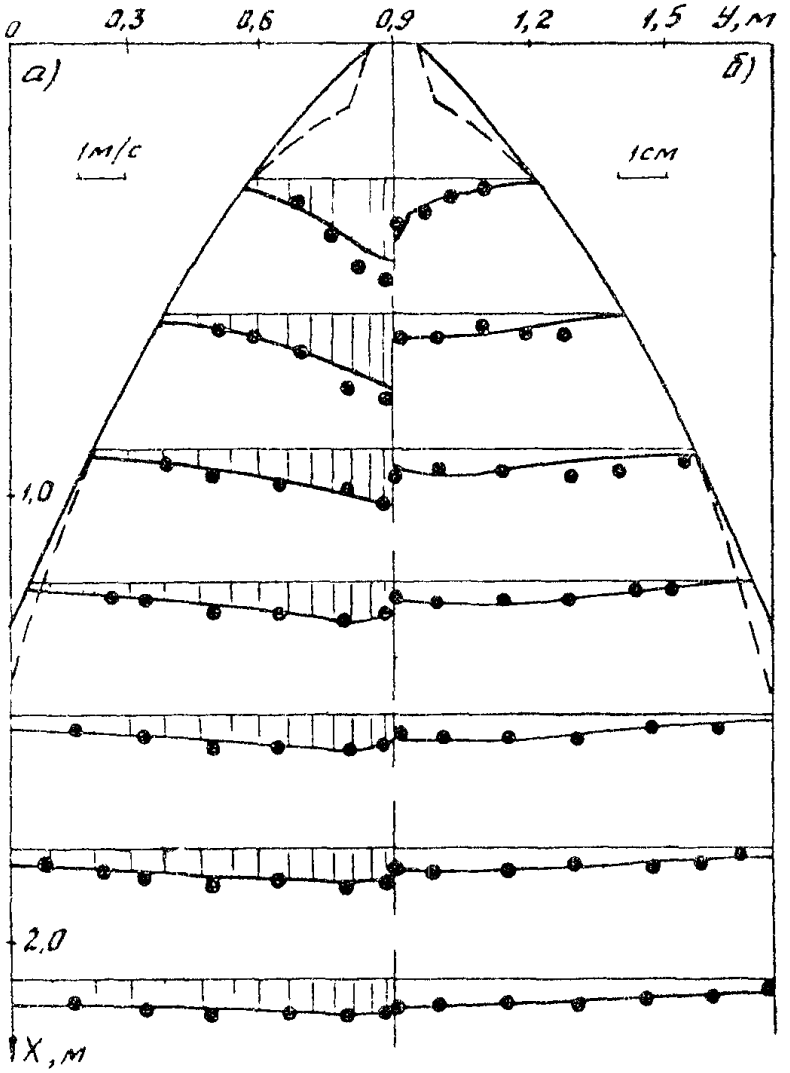


Рис. 2. Глубины и скорости потока при истечении его в лог шириной 1,8 м с плоским бетонным наклонным дном ($i_л$ – 0,05, $n_л$ = 0,014) из круглой трубы диаметром D – 0,1 м, скоростью и глубиной на выходе $v_{вых}$ = = 1,78 м/с, $h_{вых}$ = 0,035 м, приведенной шириной выхода $b_{вых}$ = 0,064 м; а – эпюры скоростей; б – эпюры глубин, ——— – расчет, ••• – эксперимент; – – – – границы растекания в эксперименте

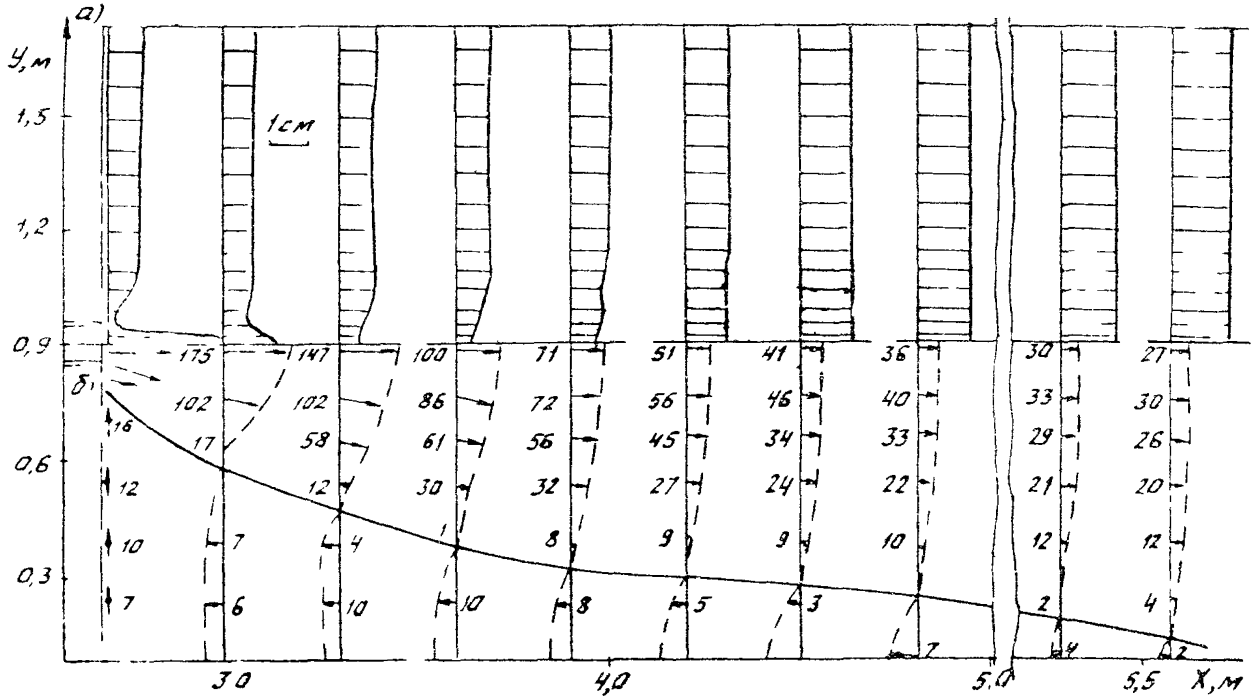


Рис. 3. Глубины (а) и скорости (б) потока при истечении его в лог с уклоном дна $i_л$ 0,001 (остальные параметры те же, что и на рис. 2):
→ – векторы скорости, 7...175 – их абсолютные значения; —— – линия нулевых скоростей

Приложение 5
Рекомендуемое

ГРАФИКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ШИРИНЫ РАСТЕКАНИЯ ПОТОКА $B_{раст}$, ГЛУБИН h И СКОРОСТЕЙ v ПОТОКА НА УКРЕПЛЕНИИ ПРИ УКЛОНЕ ВЫХОДНОГО ЛОГА $i_л > 0{,}02$

Ширину растекания потока находят по формуле (34)

$$B_{раст} = MN + b_р = \sqrt{\frac{n_ш}{0{,}015}}\, M K_м N + b_р,$$

где M, N и $K_м$ – параметры, определяемые соответственно по рис. 1, рис. 2 и таблице данного приложения;

$n_ш$ – коэффициент шероховатости дна;

0,015 – принятый в графике коэффициент шероховатости.

Значения поправочного коэффициента $K_м$ для определения ширины растекания на укреплении

$D_э$, м	Коэффициент $K_м$ при $n_ш$, равном					
	0,1	0,2	0,4	0,8	1,2	1,6
1,0	0,91	0,93	0,96	0,99	1,01	1,02
1,25	1,12	1,14	1,18	1,22	1,24	1,25
1,50	1,32	1,34	1,39	1,44	1,46	1,48
2,00	1,72	1,75	1,81	1,87	1,91	1,93
2,50	2,11	2,16	2,23	2,30	2,34	2,37
3,00	2,49	2,55	2,63	2,71	2,77	2,79
3,50	2,87	2,93	3,02	3,12	3,18	3,21
4,00	3,24	3,32	3,42	3,52	3,60	3,63
4,50	3,61	3,69	3,81	3,93	4,01	4,05
5,00	3,98	4,06	4,20	4,33	4,41	4,46

Графики для определения глубины потока h и глубин по оси потока $h_{осъ}$ на укреплении даны на рис. 3 и 4, скоростей потока v – на рис.5 настоящего приложения.

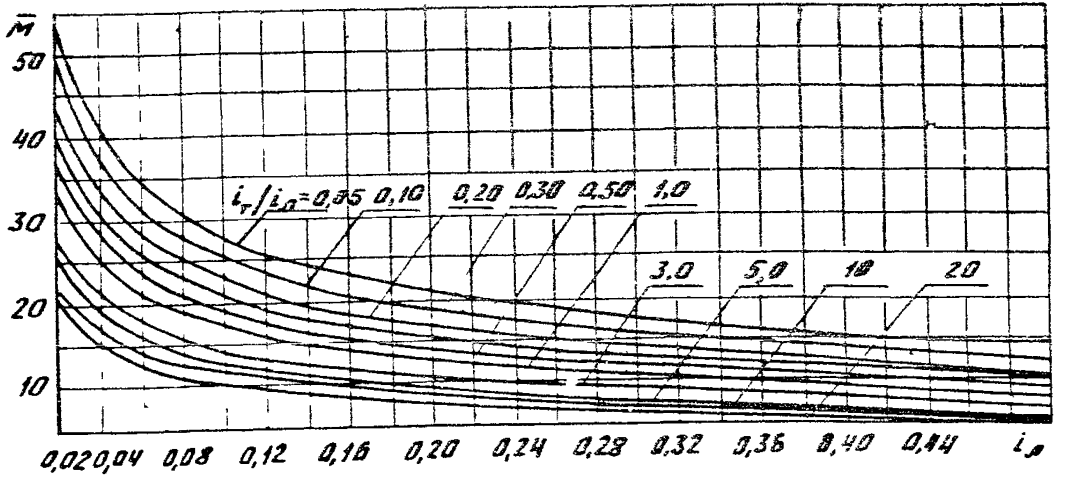


Рис. 1. График для определения параметра $\bar{M}$

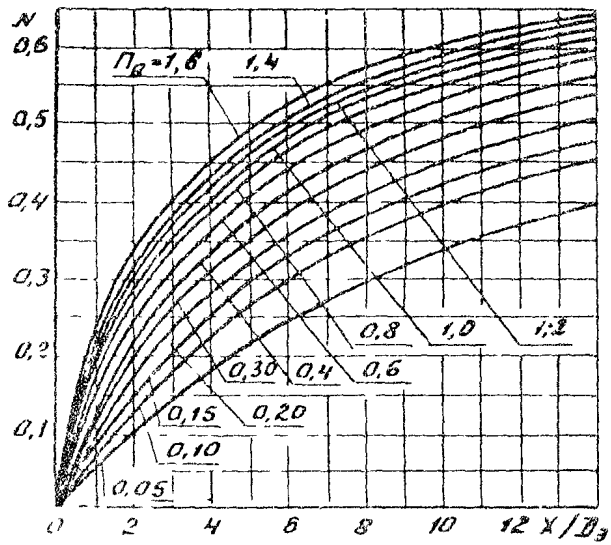


Рис. 2. График для определения параметра N

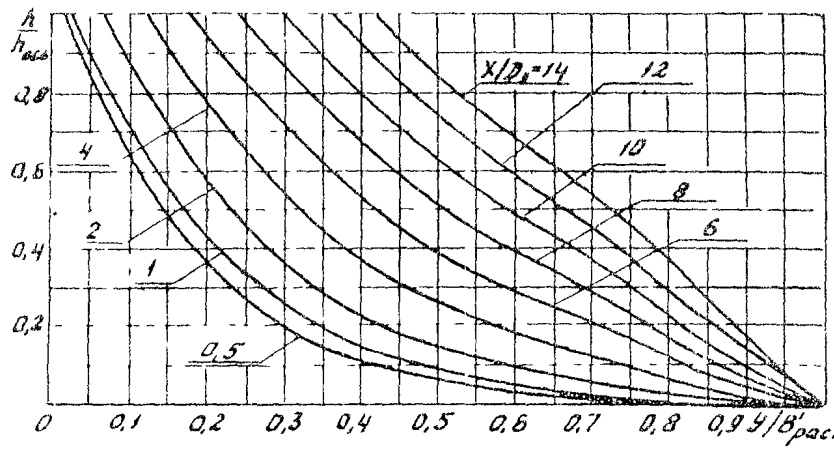


Рис. 3. График для определения глубины потока h на укреплении

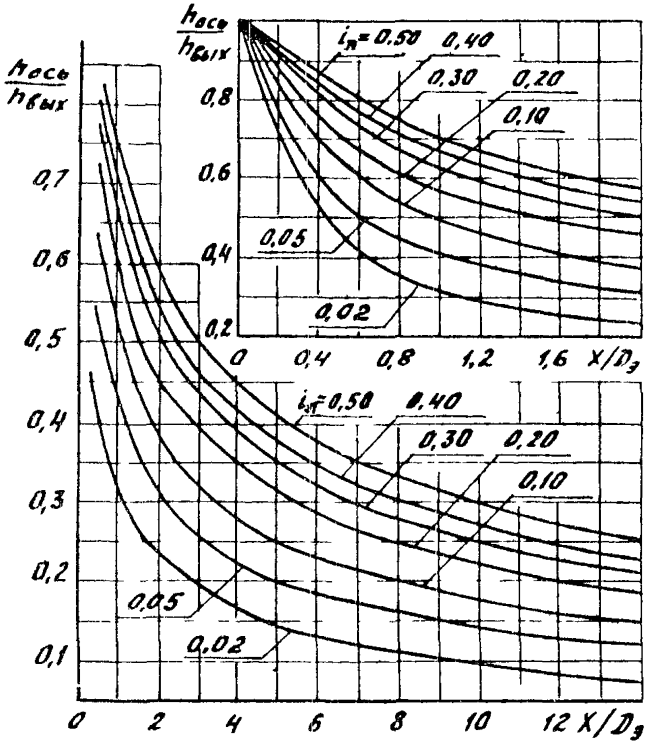


Рис. 4. График для определения глубин по оси потока $h_{ось}$ на укреплении

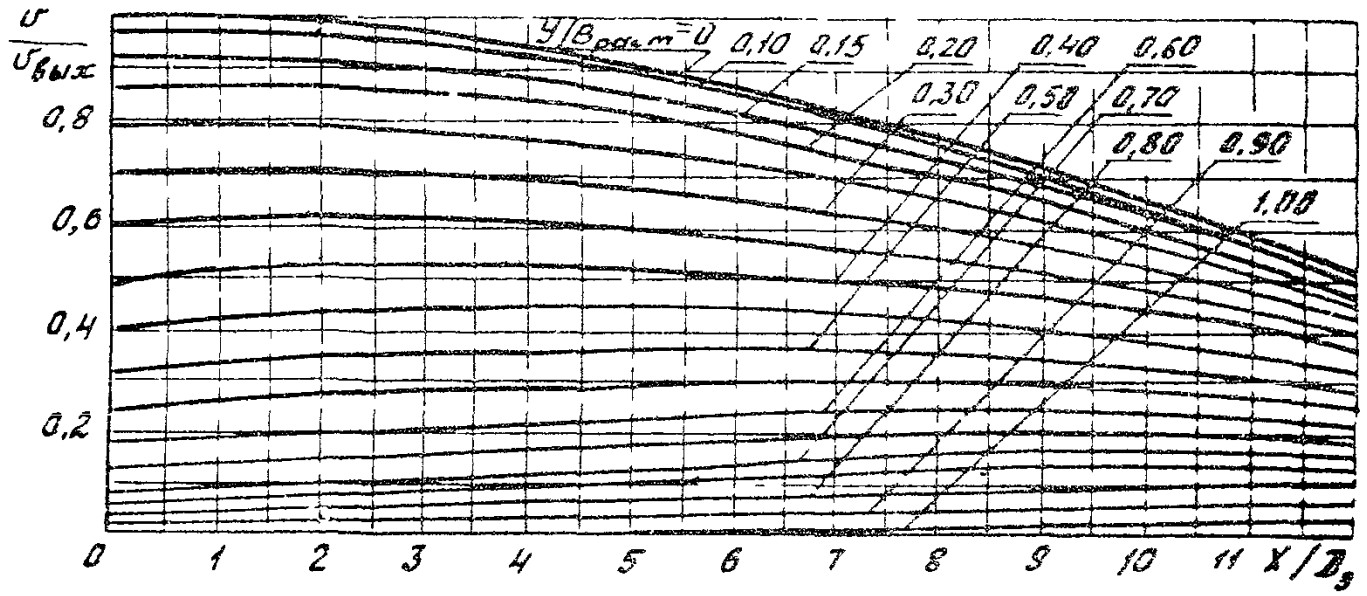


Рис. 5. График для определения скоростей потока v на укреплении

Приложение 6
Рекомендуемое

РАСЧЕТ МАКСИМАЛЬНОЙ ГЛУБИНЫ РАЗМЫВА С УЧЕТОМ ГИДРОГРАФА ПАВОДКА ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ

При формах гидрографа паводка, не поддающихся введенной в п.3.9 схематизации (например, многопиковой) расчет Δh_{max} непосредственно по формулам (40), (48), (51) - (53) может привести к заметным погрешностям. В этом случае применяется следующий алгоритм расчета:

1. Гидрограф заменяют ступенчатым, т.е. представляют в виде последовательности пар чисел $\{Q_j, T_j\}$ $j = 1, \ldots N$, где Q_j, T_j - соответственно расход на j-й ступени и ее продолжительность; N - число ступеней, выбираемое из условия обеспечения необходимой точности расчетов (обычно $N \geq 10$).

2. Задают начальную глубину размыва $\Delta h_{max(0)}$ (обычно $\Delta h_{max(0)} = 0$) и полагают $j = 0$.

3. Увеличивают j на 1 ($j = j + 1$); если $j > N$ - расчет завершен.

4. Рассчитывают $\Delta h_{пр}(Q_j)$ по формуле (48) при $Q = Q_j$. Если $\Delta h_{пр}(Q_j) < \Delta h_{max(j-1)}$, полагают $\Delta h_{max(j)} = \Delta h_{max(j-1)}$ и переходят к п. 3 алгоритма.

5. Уравнение (40) с учетом (51), (52) и величины $\Delta h_{пр}(Q_j)$ разрешают относительно t при $\Delta h_{max} = \Delta h_{max(j-1)}$ и находят t_j - время, за которое постоянный расход Q_j размоет дно на глубину $\Delta h_{max(j-1)}$ (т.е. на начало j-й ступени):

$$t_j = t_0(Q_j)\left(\frac{1}{3}\,\frac{\Delta h_{max(j-1)}}{\Delta h_{пр}(Q_j) - \Delta h_{max(j-1)}}\right)^2, \quad (1)$$

$$t_0(Q_j) = 540\left(\frac{Q_j}{Q_к}\right)^{0,25}\left[\frac{\Delta h_{пр}^3(Q_j)}{Q_j} + \frac{11}{Q_j}\left(10^{-4}C_р\right)^3\right]. \quad (2)$$

6. Полагают $t = t_j + T_j$ и по формулам (40), (48) (51), (52) при $Q = Q_j$ вычисляют глубину $\Delta h_{max(j)}$ на конец j -й ступени

$$\Delta h_{max(j)} = \left(1 - \frac{1}{3\sqrt{\frac{t_j + T_j}{t_0(Q_j)}^7 + 1}}\right)\Delta h_{пр}(Q_j), \quad (3)$$

после чего переходят к п.3 алгоритма.

По описанному алгоритму в ЦНИИСе разработана и эксплуатируется программа для расчета Δh_{max} при пропуске гидрографов типовой или произвольной формы при любых рекомендуемых типах выходных русл.

Приложение 7
Рекомендуемое

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА НИЖНЕГО БЬЕФА ТРУБ

Пример 1. (уклон лога $i_л \leq 0,02$).

Исходные данные

Круглая железобетонная труба $D = 1,5$ м без конических звеньев с раструбным оголовком $B_р = 3,2$ м расположена на автомобильной дороге. Уклон трубы $i_т = 0,05$, уклон лога $i_л = 0,01$. Расчетный расход в сооружении $Q_р = 4$ м^3/с. Объем стока $W_р = 21 \cdot 10^3$ м^3. Лог широкий в виде наклонной плоскости. Грунты лога - пески со средним диаметром частиц $d = 1$ мм. Требуется назначить тип выходного русла и определить размеры укреплений на выходе из трубы.

Расчет

1. Назначаем тип выходного русла. Труба практически полностью загружена, так как согласно [1, табл. 1, 2], расход в указанной трубе при расчетном заполнении равен $Q_р = 4,7$ м^3/с, что близко к $Q_р = 4$ м^3/с; согласно указаний разд. 4 назначаем выходное русло типа 1к.

2. Определяем скорости на выходе из трубы $v_{вых}$. Для этого по формуле (3) определяем параметр расхода $П_Q = Q/(D^2\sqrt{gD}) = 4,0/(1,5^2\sqrt{9,81 \cdot 1,5}) = 0,46$ и по графику рис. 1 приложения 3 находим $v_{вых}/\sqrt{gD} = 1,4$ и $v_{вых} = 1,4 \cdot \sqrt{9,81 \cdot 1,5} = 5,37$ м/с. Максимальные скорости на укреплении $v_{укр(max)}$ при $i_т > 0,02$ согласно п.2.17 принимают равными $v_{укр(max)} = v_{вых} = 5,4$ м/с.

3. Назначаем тип укрепления. По [1, табл. П-6] при $v_{укр(max)} 5,4$ м/с принимаем бетонное монолитное укрепление длиной $L = 2D = 2 \cdot 1,5 = 3$ м (см.п.4.3).

4. Определяем глубину размыва в принятом выходном русле в такой последовательности:

а) вычисляем предельную глубину размыва по формуле (48), для чего предварительно вычисляем $Q_к$ и $\delta_м$ (см. пояснения соответственно к формулам (27) и (48)):

$$Q_к = 0,5\sqrt{g}\, D^{5/2} = 0,51\sqrt{9,81}\cdot 1,5^{5/2} = 4,4 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$\delta_м = 0,85\left(\frac{1}{D}\right)^{0,075} = 0,85\left(\frac{1}{1,5}\right)^{0,075} = 0,82.$$

Для принятого выходного русла 1к $\psi = 1$ и для него по табл. 4 находим $\tau = 0,9$ и $S = 0,6$.
Тогда имеем

$$\Delta h_{пр} = 0,9\cdot 0,82\cdot 1,0\cdot 1,5\left(\frac{4,0}{4,4}\right)^{0,6}\left[\frac{1,5^3}{(2,0+1)\cdot 1,5\cdot 3,2\cdot 0,001}\right]^{0,2} =$$

$= 3,1$ м;

б) определяем продолжительность паводка по формуле (53)

$$t = 0,5\frac{W_р}{Q} = 0,5\frac{21\cdot 10^3}{4,0} = 2570 \text{ с};$$

в) определяем эталонное время размыва по формуле (52) при $C_р = 0$ (несвязные грунты)

$$t_o = 540\left(\frac{Q}{Q_к}\right)^{0,25}\cdot\frac{\Delta h_{пр}^3}{Q} = 540\left(\frac{4,0}{4,4}\right)^{0,25}\frac{3,10^3}{4,0} =$$

$= 3925$ с;

г) определяем долю предельной глубины размыва, осуществляемую за время прохождения паводка, по формуле (51)

$$\eta = 1 - \frac{1}{3\sqrt{\frac{t}{t_o}} + 1} = 1 - \frac{1}{3\sqrt{\frac{2570}{3925}} + 1} = 0,71;$$

д) определяем максимальную глубину размыва по формуле (40)

$$\Delta h_{max} = \Delta h_{пр}\,\eta = 3,10\cdot 0,71 = 2,2 \text{ м};$$

е) назначаем расчетное значение удельного объема камня в рисберме, исходя из условия $\bar{W}_{к(min)} \leq W_к \leq \bar{W}_{к(max)}$, для чего находим величины $\bar{W}_{к(min)}$ и $\bar{W}_{к(max)}$ соответственно по формулам (43) и (44). В первом приближении крупность камня при этом принимаем равным $d_н = 0,1$ м.

$$\bar{W}_{к(min)} = A d_н \frac{\Delta h_{max}}{1 - (\frac{d}{d_н})^{1/3} \frac{1}{\eta}} =$$

$$= 0,13 \cdot 0,1 \frac{2,20}{1 - (\frac{0,001}{0,1})^{1/3} \frac{1}{0,71}} = 0,04 \text{ м}^3/\text{м};$$

$$\bar{W}_{к(max)} = 1,4 \ (D_э \frac{Q}{Q_к})^2 = 1,4 (1,5 \frac{4,0}{4,4})^2 = 2,6 \text{ м}^3/\text{м}.$$

Принимаем $\bar{W}_к = 0,25$ м^3/м;

ж) уточняем принятую крупность камня в рисберме, исходя из формулы (42)

$$d_н \geq d^{1/4} \left(\frac{\Delta h_{пр}}{10 - A \frac{\Delta h^2_{max}}{\bar{W}_к}} \right)^{3/4}, \text{т.е.}$$

$$d_н \geq 0,001^{1/4} \left(\frac{3,10}{10 - 0,13 \frac{2,20^2}{0,25}} \right)^{3/4} = 0,09 \text{ м}.$$

Следовательно, крупность камня $d_н = 0,1$ м принята правильно;

з) определяем глубину размыва в принятом выходном русле по формуле (41)

$$\Delta h_{max(н)} = \Delta h_{пр} \left(\frac{d}{d_н}\right)^{1/3} + A d_н \frac{\Delta h^2_{max}}{\bar{W}_к} =$$

$$= 3,10 \left(\frac{0,001}{0,10}\right)^{1/3} + 0,13 \cdot 0,1 \frac{2,20^2}{0,25} = 0,95 \text{ м} < 2,0 \text{ м},$$

т.е. тип выходного русла 1к назначен правильно.

5. Назначаем глубину заделки концевой части укрепления для типа 1к – глубину заложения предохранительного откоса. Согласно указаниям п.4.4 принимаем глубину заложения концевой части укрепления равной

$$\Delta h_{укр} = 1,2\,\Delta h_{max(н)} = 1,2 \cdot 0,95 = 1,15 \text{ м}.$$

6. Определяем ширину растекания потока. При $i_л \leq 0,02$ расчет выполняем по формуле (26), предварительно вычислив показатель степени S по формуле (27) и коэффициент K по графику (см.рис.4).

При $\frac{x}{D} = 2$ и $\frac{\Delta h_{max}}{D} = \frac{2,20}{1,5} = 1,47$ $K = 0,73$; $S =$

$$= 1,8 \lg\left[\frac{1}{K}\,\frac{\Delta h_{max}}{D_э}\left(\frac{Q_к}{Q}\right)^{0,2}\right];$$

$$S = 1,8 \lg\left[\frac{1}{0,73}\,\frac{2,20}{1,5}\left(\frac{4,4}{4,0}\right)^{0,2}\right] \approx 0,64;$$

$$B_{раст} = B\left[\left(\frac{x}{D_э}+1\right)^{S}-1\right] + b_р = 1,5\left[\left(\frac{x}{1,5}+1\right)^{0,64}-1\right]+3,2$$

Результаты расчетов приведены в табличной форме.

x, м	x/D	$B_{раст}$, м
0	0	3,2
1,0	0,67	4,2
2,0	1,35	5,0
3,0	3,00	5,5

7. Определяем ширину укрепления. Расчет выполняем в такой последовательности:

а) назначаем ширину укрепления на всей ее длине, кроме концевой части, по ширине растекания с запасом, равным по 1 м с каждой стороны укрепления $B = B_{раст} +$ 2,0 м

б) находим ширину укрепления в конце его по формуле (67) при $\theta = 3,0$ и $\Delta h_{кан} = 0$

$$B_{min} = \frac{\theta}{K}\Delta h_{max} = \frac{3,0}{0,73}\,2,20 = 9,3 > B_{раст(max)} + 2,0 = 5,5 + 2,0 = 7,5 \text{ м};$$

в) принимаем окончательные размеры укрепления в плане, исходя из кратности их 0,5 м, приведенные на рис.1.

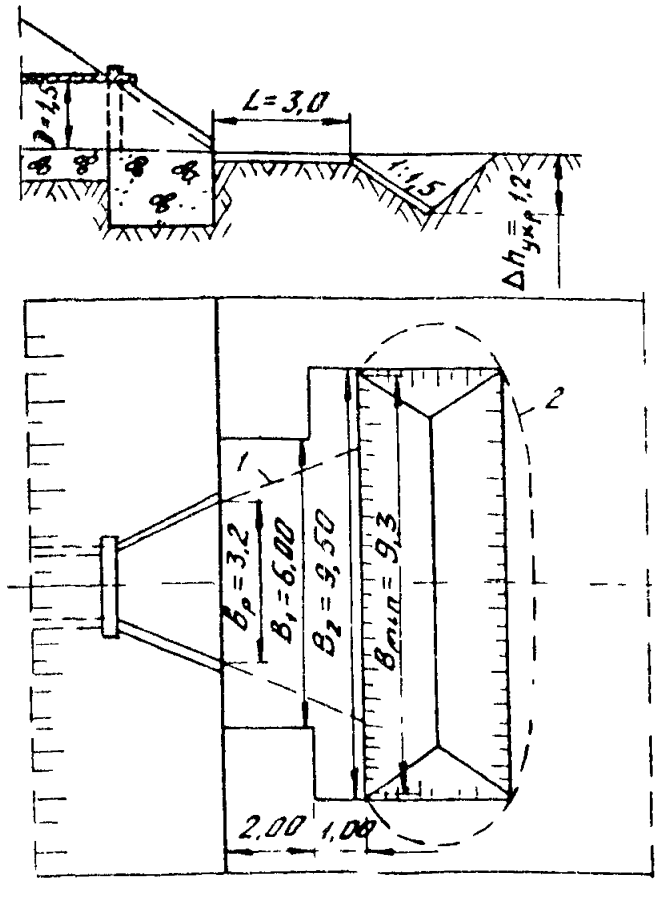


Рис. 1. Конструкция и размеры укреплений, полученные в результате расчета нижнего бьефа трубы при $i_л \leq 0,02$: 1–граница растекания, 2–контур воронки размыва

Пример 2. (уклон лога $i_л > 0,02$).

Исходные данные

Прямоугольная типовая железобетонная труба отверстием $b \times h_т$ = 1,5х2,0 м с раструбным оголовком $b_р$ = 3,7 м расположена на железной дороге в средней полосе страны. Уклон трубы $i_т$ = 0,15. Труба запроектирована со ступенчатой укладкой звеньев, со ступенями высотой Δ = 0,30 м и длиной ℓ = 2,0 м.

Уклон и коэффициент шероховатости лога соответственно равны $i_л = 0,05$, $n_л = 0,045$. Расчетный расход в сооружении $Q_р = 9,0$ м^3/с, наибольший $Q_{max} = 11,5$ м^3/с. В результате гидравлического расчета установлено, что расчетный и наибольший расходы проходят при безнапорном режиме Объем стока: при расчетном паводке $W_р = 48,5 \cdot 10^3$ м^3, при наибольшем $W_{max} = 60,0 \cdot 10^3$ м^3. Лог широкий в виде наклонной плоскости, грунт лога - глины с расчетным сцеплением $C_р = 0,5 \cdot 10^5$ Па.

Требуется назначить тип выходного русла и определить размеры укреплений на выходе из трубы.

Расчет

1. Назначаем тип выходного русла. Труба практически полностью загружена и имеет большой уклон. Согласно рекомендациям разд. 4 назначаем выходное русло типа 1 к.

2. Определяем глубины и скорости на выходе из трубы при ступенчатой укладке звеньев и на укреплении в следующем порядке:

а) вычисляем параметр $\Pi_Д = \frac{Q\sqrt[3]{Д/g}}{14\sqrt{i_т}}$ (см. п.2.10):

при $Q_р$ $\Pi_{Д(р)} = \frac{9,0\sqrt[3]{0,3/2,0}}{14\sqrt{0,15}} = 0,88$;

при Q_{max} $\Pi_{Д(max)} = \frac{11,5\sqrt[3]{0,3/2,0}}{14\sqrt{0,15}} = 1,12$;

б) по графику (см. рис.3) находим:

при $Q_р$ $\frac{h_{вых}}{g} = 0,61$ и $h_{вых(р)} = 0,61 \cdot 1,5 = 0,92$ м;

при Q_{max} $\frac{h_{вых}}{g} = 0,74$ и $h_{вых(max)} = 0,74 \cdot 1,5 = 1,11$ м;

в) находим скорости на выходе из трубы по формуле (17):

при $Q_р$ $v_{вых(р)} = \frac{Q_р}{g\, h_{вых(р)}} = \frac{9,0}{1,5 \cdot 0,92} = 6,5$ м/с;

при Q_{max} $V_{вых(max)} = \frac{11,5}{1,5 \cdot 1,11} = 6,9$ м/с;

г) максимальные скорости на укреплении $V_{укр(max)}$ согласно п.2.17 принимают $V_{укр(max)} = V_{вых}$. Следовательно,

при Q_p $V_{укр(max)p} = V_{вых(p)} = 6,5$ м/с;

при Q_{max} $V_{укр(max)max} = V_{вых(max)} = 6,9$ м/с.

Так как $\frac{V_{укр(max)max}}{V_{укр(max)p}} = 1,06 < 1,35$, а допускаемые скорости при прохождении наибольшего расхода можно повышать на 35 % (см.п.1.13), то к расчету принимаем максимальную скорость при расчетном расходе

$V_{укр(max)p} = 6,5$ м/с.

3. Назначаем тип укрепления по [1, табл. П-6] ; при $V_{max} = 6,5$ м/с принимаем бетонное монолитное укрепление. Предварительно определяем эквивалентный диаметр сооружения по формуле (5)

$D_э = 1,13\sqrt{\omega_{coop}} = 1,13\sqrt{1,5 \cdot 2,0} = 1,96$ м.

Согласно п.4.3 длина укрепления $\mathcal{L} = 1,5\ D_э = 1,5 \cdot 1,96 = 3$ м.

4. Определяем глубину размыва в принятом выходном русле в такой последовательности:

а) вычисляем предельную глубину размыва по формуле (48). Для этого предварительно вычисляем $Q_к$ и $\delta_м$ (см. пояснение соответственно к формулам (24) и (48)) и расчетный диаметр грунтов по формуле (50)

$$Q_к = 0,51\sqrt{g}\, D_э^{5/2} = 0,51\sqrt{9,81} \cdot 1,96^{5/2} = 8,57 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$\delta_м = 0,85\ (\frac{1,0}{D_э})^{0,075} = 0,85\ (\frac{1}{1,96})^{0,075} = 0,81.$$

Расчетный диаметр грунтов при $C_p = 0,5 \cdot 10^5$ Па равен

$d = 10\,(0,15 + 10^{-4} C_p) = 10\,(0,15 + 10^{-4} \cdot 0,5 \cdot 10^5) = 51$ мм.

Для принятого выходного русла 1к имеем $\Psi = 1$, а величины $\tau = 0,9$ и $S = 0,6$ находим по табл. 4. Тогда получим:

при Q_p $\Delta h_{пр} = 0{,}9\delta_м \Psi D_э \left(\frac{Q}{Q_к}\right)^{0,6} \left[\frac{D_э^3}{(2/D_э+1)\cdot b\cdot b_p\, d}\right]^{0,2} =$

$$= 0{,}9\cdot 0{,}81\cdot 1\cdot 1{,}96 \left(\frac{9{,}0}{8{,}57}\right)^{0,6} \left[\frac{1{,}96^3}{(1{,}5+1)\cdot 1{,}5\cdot 3{,}7\cdot 0{,}051}\right]^{0,2} =$$

$= 2{,}24$ м;

при Q_{max}

$$\Delta h_{пр} = 0{,}9\cdot 0{,}81\cdot 1\cdot 1{,}96 \left(\frac{11{,}5}{8{,}57}\right)^{0,6} \left[\frac{1{,}96^3}{(1{,}5+1)\cdot 1{,}5\cdot 3{,}7\cdot 0{,}051}\right]^{0,2} =$$

$= 2{,}59$ м;

б) определяем продолжительность паводка по формуле (53):

при Q_p $t = 0{,}5\,\frac{W_p}{Q_p} = 0{,}5\,\frac{48{,}5\cdot 10^3}{9{,}0} \approx 2700$ с;

при Q_{max} $t = 0{,}5\,\frac{W_{max}}{Q_{max}} = 0{,}5\,\frac{60\cdot 10^3}{11{,}5} \approx 3300$ с;

в) определяем эталонное время размыва по формуле (52):

при Q_p $t_o = 540 \left(\frac{Q}{Q_к}\right)^{0,25} \left[\frac{\Delta h_{пр}}{Q} + \frac{11}{Q}\left(10^{-4} C_p\right)^3\right] =$

$$= 540 \left(\frac{9{,}0}{8{,}57}\right)^{0,25} \left[\frac{2{,}24^3}{9{,}0} + \frac{11}{9{,}0}\left(10^{-4}\cdot 0{,}5\cdot 10^5\right)^3\right] = 88000 \text{ с};$$

при Q_{max}

$$t_o = 540 \left(\frac{11{,}5}{8{,}57}\right)^{0,25} \left[\frac{2{,}59^3}{11{,}5} + \frac{11}{11{,}5}\left(10^{-4}\cdot 0{,}5\cdot 10^5\right)^3\right] = 74500 \text{ с}.$$

г) определяем долю предельной глубины размыва за время прохождения паводка по формуле (51)

при Q_p $\eta = 1 - \frac{1}{3\sqrt{\frac{t}{t_o}} + 1} = 1 - \frac{1}{3\sqrt{\frac{2700}{88000}} + 1} = 0{,}35;$

при Q_{max} $\eta = 1 - \frac{1}{3\sqrt{\frac{3300}{74500}} + 1} = 0,4;$

д) определяем максимальную глубину размыва по формуле (40):

при Q_p $\Delta h_{max} = \Delta h_{пр}\,\eta = 2,24 \cdot 0,35 = 0,78$ м,

при Q_{max} $\Delta h_{max} = \Delta h_{пр}\,\eta = 2,59 \cdot 0,4 = 1,04$ м.

Так как глубины размыва как при Q_p, так и при Q_{max} оказались менее 2,0 м, то корректируем тип выходного русла и принимаем в качестве расчетного выходное русло типа 1, т.е. отказываемся от каменной наброски.

В связи с тем, что выходной лог имеет уклон $i_л = 0,05 > 0,02$, то определяем основные размеры промоины.

При неявно выраженном логе расчет промоины ведем в такой последовательности.

1. Вычисляем по формуле (54) ширину потока $B_{нр}$, при которой скорость в логе равна неразмывающей скорости, предварительно вычисленной по формуле (55)

$$v_н = 2,1\sqrt{gd} = 2,1\sqrt{9,81 \cdot 0,051} = 1,49 \text{ м/с.}$$

Тогда имеем:

при Q_p $B_{нр} = \frac{Q_p\, i_л^{3/4}}{v_н^{5/2}\, n_л^{3/2}} = \frac{9,0 \cdot 0,05^{3/4}}{1,49^{5/2} \cdot 0,045^{3/2}} =$ $= 36,6$ м;

при Q_{max} $B_{нр} = \frac{11,5 \cdot 0,05^{3/4}}{1,49^{5/2} \cdot 0,045^{3/2}} = 46,7$ м.

2. Определяем ширину створа предельного растекания по формуле (56) при $N = 1$, предварительно установив параметры расхода по формуле (4), параметры M K_M соответственно по рис.1 и таблице приложения 5 и по формуле, приведенной в том же приложении 5.

При $i_л = 0,05$ и $\frac{i_г}{i_л} = \frac{0,15}{0,05} = 3$ по графику см. рис.1 приложения 5)

для Q_P и $\Pi_a = \frac{Q}{b h_r \sqrt{g h_r}} = \frac{8,0}{1,5 \cdot 2,0 \sqrt{9,81 \cdot 2}} = 0,68$

находим $M = 18,1$, по таблице при $D_э =$ $= 1,96$ и $\Pi_a = 0,68$ находим $K_M = 1,86$ и по формуле $M = M \cdot K_M \sqrt{\Pi_л / 0,015} = 18,7 \cdot 1,86 \sqrt{0,045/0,015} = 60,2$ м. Тогда $B_{раст(пр)} = 60,2 + 3,7 = 63,9$ м.

При Q_{max} $\Pi_a = \frac{11,5}{1,5 \cdot 2,0 \sqrt{9,81 \cdot 2,0}} = 0,87$;

$M = 18,7$, $K_M = 1,88$; $M = 18,7 \cdot 1,88 \sqrt{0,045/0,015} =$ $= 60,8$ м. $B_{раст(пр)} = 60,8 + 3,7 = 64,5$ м.

3. Сравниваем $B_{нр}$ с $B_{раст(пр)}$:

при Q_P $B_{нр} = 36,6$ м $< B_{раст(пр)} = 63,7$ м;

при Q_{max} $B_{нр} = 46,7$ м $< B_{раст(пр)} = 64,5$ м.

Следовательно, промоина имеет ограниченное протяжение.

4. Определяем положение створа, в котором прекращается размыв по формуле (57), предварительно вычислив N по формуле (50):

при Q_P $N = \frac{B_{нр} - b_P}{M} = \frac{36,6 - 3,7}{60,2} = 0,55$;

$$X_{нр} = \frac{0,57 D_э}{\Pi_a^{0,44} i_P^2 N} = \frac{0,57 \cdot 1,96}{0,68^{0,44} i_P^2 0,55} = 19,4 \text{ м};$$

при Q_{max} $N = \frac{46,7 - 3,7}{60,8} = 0,71$;

$$X_{нр} = \frac{0,57 \cdot 1,96}{0,87^{0,44} i_P^2 0,71} = 53,5 \text{ м}.$$

5. Определяем глубину потока в створе прекращения размыва по формуле (58):

при Q_P $h_{нр} = \left(\frac{Q \Pi_л}{B_{нр} \sqrt{i_л}} \right)^{3/5} = \left(\frac{8,0 \cdot 0,045}{36,6 \sqrt{0,05}} \right)^{3/5} =$ $= 0,16$ м;

при Q_{max} $h_{нр} = \left(\frac{11,5 \cdot 0,45}{46,7 \cdot \sqrt{0,05}} \right)^{3/5} = 0,16$ м.

6. Определяем ширину растекания потока в створе на входе в канаву $B_{раст(кан)}$ по формуле (34) при $X = X_{кан}$, предварительно вычислив $X_{кан}$ по формуле (60)

и определив параметр N по графику (рис.2 приложения 5) (параметры M вычислены ранее):

при $Q_р$ $X_{кан} = 3,5\Delta h_{max} + \mathcal{Z} = 3,5 \cdot 0,78 + 3,0 =$ $= 5,7$ м, и по величинам $\frac{X_{кан}}{D_э} = \frac{5,7}{1,96} = 2,9$ и $П_а =$ $= 0,68$ находим $N = 0,32$, а затем $B_{раст(кан)} = MN +$ $+ b_р = 60,2 \cdot 0,32 + 3,7 = 23$ м.

При Q_{max} $X_{кан} = 3,5 \cdot 1,04 + 3,0 = 6,65$ м. По $\frac{X_{кан}}{D_э} =$ $= \frac{6,65}{1,96} = 3,4$ и $П_а = 0,87$ находим $N = 0,36$, а затем

$B_{раст(кан)} = 60,8 \cdot 0,36 + 3,7 = 25,6$ м.

7. Находим $b_{кан}$ и глубину потока $h_{кан}$ на входе в канаву при стабилизации размыва по формулам (61) и (62):

при $Q_р$ $b_{кан} = \frac{35 Q^{0,528} i_д^{0,943}}{d^{0,32} g^{0,264}} =$

$= \frac{35 \cdot 9,0^{0,528} \cdot 0,05^{0,943}}{0,051^{0,32} \cdot 9,81^{0,264}} = 9,44$ м $< B_{раст(кан)} =$ $= 23,0$ м и к расчету принимаем $b_{кан} = 9,44$ м;

$$h_{кан} = \left(\frac{Q}{1,15 \sqrt{g}\, d^{0,25} b_{кан}} \right)^{4/5} =$$

$$= \left(\frac{9,0}{1,15 \cdot \sqrt{9,81} \cdot 0,051^{0,25} \cdot 9,44} \right)^{4/5} = 0,63 \text{ м;}$$

при Q_{max} $b_{кан} = \frac{35 \cdot 11,5^{0,528} \cdot 0,05^{0,943}}{0,051^{0,32} \cdot 9,81^{0,264}} = 10,75$ м $<$ $B_{раст(кан)} = 25,6$ м и к расчету принимаем $b_{кан} =$ $= 10,75$ м,

$$h_{кан} = \left(\frac{11,5}{1,15 \cdot \sqrt{9,81} \cdot 0,051^{0,25} \cdot 10,75} \right)^{4/5} = 0,69 \text{ м.}$$

8. Определяем среднюю глубину потока в канаве по формуле (63) при $Q_р$:

$h_{кан(ср)} = \frac{1}{2}(h_{кан} + h_{нр}) = \frac{1}{2}(0,63 + 0,16) = 0,40$ м;

при Q_{max} $h_{кан(ср)} = \frac{1}{2}(0,069 + 0,16) = 0,42$ м.

9. Определяем глубины размыва канавы по формуле (64), предварительно определив $C_{кан}$ по формуле (65):

при $Q_р$ $C_{кан} = \frac{1}{n} h_{кан(ср)}^{1/6} = \frac{1}{0,045} 0,40^{1/6} = 19,1$

$$\Delta h_{кан} = (X_{нр} - X_{кан})\left(i_л - \frac{v_н^2}{c^2 Q} \frac{b_{нр} + b_{кан}}{2}\right) + h_{кан} - h_{нр} =$$

$$= (19,4 - 5,7)\left(0,05 - \frac{1,49^3}{19,1^2 \cdot 9} \cdot \frac{36,6 + 9,4}{2}\right) + 0,69 - 0,16 =$$

$= 0,84$ м;

при Q_{max} $C_{кан} = \frac{1}{0,045} 0,42^{1/6} = 19,2$

$$\Delta h_{кан} = (53,5 - 6,7)\left(0,05 - \frac{1,49^3}{19,2^2 \cdot 11,5} \frac{46,7 + 10,8}{2}\right) +$$

$+ 0,69 - 0,16 = 1,8$ м.

10. Уточняем расстояние до входа в канаву по формуле (66) при $m = 1,5$:

при $Q_р$ $X'_{кан} = X_{кан} + \frac{m \Delta h_{кан}}{1 - m i_л} = 5,7 + \frac{1,5 + 0,84}{1 - 1,5 \cdot 0,05} =$

$= 7,1$ м $\frac{X'_{кан} - X_{кан}}{X_{кан}} = \frac{7,1 - 5,7}{7,1} = 0,19 < 0,3$ – корректировка $X_{кан}$ не требуется;

при Q_{max} $X'_{кан} = 6,6 + \frac{1,5 \cdot 1,8}{1 - 1,5 \cdot 0,05} = 9,37$ м

$\frac{9,37 - 6,6}{9,37} = 0,295 < 0,3$ – корректировка $X_{кан}$ не требуется. Вычисленные значения $X_{кан}$ принимаются к расчету.

11. Определяем глубину заложения концевой части укрепления по формуле (67), причем при $Q_р$ $\Delta h_{укр}$ величиваем на 20 %

при $Q_р$ $\Delta h_{укр(р)} = 1,2\left[\frac{\Delta h_{max}(1 + 2 i_л) + \Delta h_{кан}}{1 - m i_л}\right] =$

$= 1,2\left[\frac{0,78(1 + 2\cdot0,05) + 0,84}{1 - 1,5\cdot0,05}\right] = 2,20$ м $< 3,5$ м;

при $Q_{max}\ \Delta h_{укр(max)}$ $\frac{1,04(1+2\cdot0,05)+1,80}{1 - 1,5\cdot0,05} = 3,18$ м $<$

$< 3,5$ м;

для расчета принимаем $\Delta h_{укр} = 3,18$ м.

12. Определяем ширину растекания потока на укреплении при $n = 0,015$. При $i_л > 0,02$ расчет выполняем по формуле (34) при $x = 1,2$ и 3 м, предварительно вычислив параметр $\bar{M}$ ($\bar{M} = 18,7$) по графику (см.рис.1) и формуле приложения 5 и параметр N по графику (см.рис.2) того же приложения. Расчет ведем в табличной форме.

x, м	$x/D_э$	Расчетные параметры и ширина растекания при пропуске расходов							
		расчетного ($П_а = 0,68$)				наибольшего ($П_а = 0,87$)			
		$K_м$	N	$N\bar{M}K_м$	$B_{раст}$	$K_м$	N	$N\bar{M}K_м$	$B_{раст}$
1,0	0,5	1,86	0,080	2,8	6,5	1,88	0,105	3,7	7,4
2,0	1,0	1,86	0,155	5,4	9,1	1,88	0,170	6,0	9,7
3,0	1,5	1,86	0,210	7,3	11,0	1,88	0,230	8,1	11,8

Для расчета принимаем величину растекания при наибольшем расходе.

13. Определяем ширину укрепления. Расчет выполняем в такой последовательности:

а) назначаем ширину укрепления на всей его длине, кроме концевой части длиной 1 м, по ширине растекания с запасом по 1 м с каждой стороны укрепления $B = B_{раст} + 2,0$, м.

Результаты расчета приведены ниже

x, м	0	1,0	2,0
B, м	5,7	9,4	11,7

б) находим ширину воронки размыва в конце укрепления B_{min} по формуле (68) при $\vartheta = 3$ (концевая часть с предохранительным откосом), определив коэффициент формы воронки размыва по графику рис.4 при $x/D_э = 1,5$.

При $Q_р$ $\frac{\Delta h_{max}}{D_э} = \frac{0,78 + 0,84}{1,96} = \frac{1,62}{1,96} = 0,83$; $K = 0,62$;

$$B_{min} = \frac{3,0}{0,62} 1,62 \approx 7,84 \text{ м} < B_{раст} = 11,8 \text{ м},$$

При Q_{max} $\frac{\Delta h_{max}}{D_э} = \frac{1,04 + 1,80}{1,96} = 1,45$; $K = 0,80$;

$$B_{min} = \frac{3,0}{0,80} \cdot 2,84 = 10,65 \text{ м} < B_{раст} = 11,8 \text{ м}.$$

Следовательно, ширина укрепления на всем его протяжении определяется шириной растекания, которая оказалась весьма значительной.

Для сокращения ширины укрепления ограничим его изолиниями, соответствующими неразмывающей скорости потока для грунтов лога, определенной выше и равной $v_н = 1,49$ м/с.

Для этого воспользуемся графиком (рис.5 приложения 5), предварительно заменив скорость v на $v_н$ при $Q_р$ $\frac{v_н}{v_{вых}} = \frac{1,49}{6,5} = 0,23$, при Q_{max} $\frac{v_н}{v_{вых}} = \frac{1,49}{6,9} = 0,22$.

По графику (см.рис.5 приложения 5) находим величину относительной граничной ширины растекания $(y/B_{раст})_{гр}$ в каждом створе, ограничивающей область, за пределами которой скорости потока на укреплении не будут превосходить неразмывающих, и определим размеры укрепления, соответствующие этой ширине $B_{гр}$ с запасом по 1 м в каждую сторону.

Результаты расчета приведены ниже в табличной форме.

x	$x/D_э$	Относительная и абсолютная граничная ширина растекания и ширина укрепления при пропуске расходов					
		расчетного			наибольшего		
		$y/B_{раст}$	$B_{гр}$, м	B, м	$y/B_{раст}$	$B_{гр}$, м	B, м
0	0	0,55	3,7	5,7	0,56	3,7	5,7
1,0	0,5	0,56	3,7	5,7	0,57	4,2	6,2
2,0	1,0	0,57	5,2	7,2	0,575	5,6	7,6
3,0	1,5	0,575	6,3	8,3	0,58	6,8	8,8

Ширину укрепления в конце его необходимую при пропуске наибольшего расхода $B_{укр}$ = 8,8 м сравниваем с B_{min}. $B_{укр}$ = 8,8 м < B_{min} = 10,65 м – для расчета принимаем $B_{укр}$ = 10,65 и корректируем размеры укрепления из конструктивных соображений, принимая их кратными 0,5 м. Результаты расчета приведены на рис. 2.

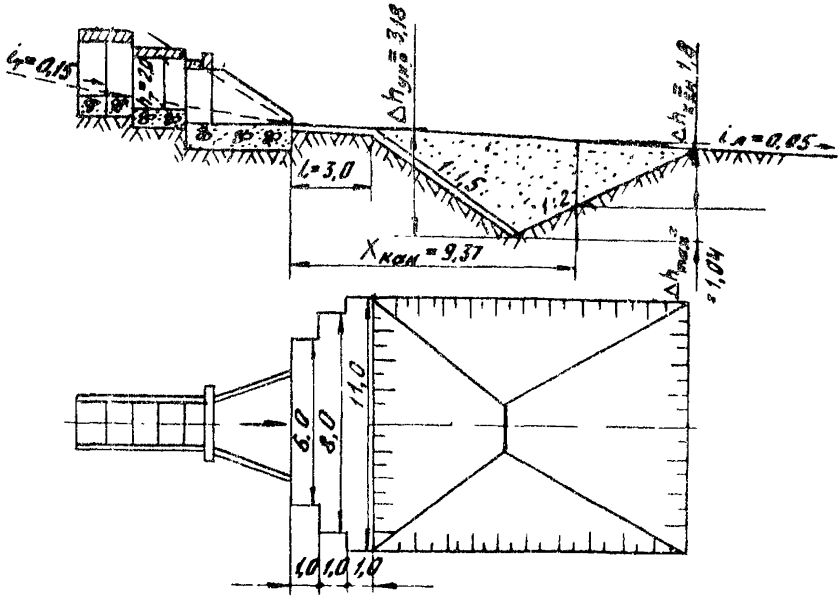


Рис. 2. Конструкция и размеры укреплений, полученные в результате расчета нижнего бьефа трубы при уклоне выходного лога $i_л > 0,02$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руководство по гидравлическим расчетам малых искусственных сооружений. М., Транспорт, 1974.

2. Рекомендации по расчету выходных русл дорожных водопропускных труб с укреплениями из каменной наброски. М., ЦНИИС, 1980.

3. Строительные нормы и правила. Мосты и трубы. СНиП 2.05.03-84. М., Госстрой СССР, 1985.

4. Методические рекомендации по гидравлическому расчету металлических гофрированных труб. М., ЦНИИС 1979.

5. Семенов А.Ю. Применение метода Годунова к уравнениям мелкой воды с учетом рельефа дна. "Труды 8 конф. молодых ученых Московского физико-технического института. Долгопрудный, 27 марта - 7 апреля 1983, ч.1" М., МФТИ, № 5927-83 ДЕП.

6. Беликов В.В., Семенов А.Ю. Метод Годунова с модификацией Колгана для численного решения двумерных уравнений мелкой воды. "Труды 10 конф. молодых ученых Московского физико-технического института, Долгопрудный, 23 марта-7 апреля 1985, ч.1. М., МФТИ, №5983-85ДЕП

7. Беликов В.В., Семенов А.Ю. Применение метода Годунова с модификацией Колгана к расчету планов течений в нижних бьефах водопропускных труб. В сб. "Гидравлика дорожных водопропускных сооружений". Саратов, СПИ, 1985.

8. Беликов В.В. Безытерационный алгоритм расчета распада разрыва для уравнений мелкой воды. В сб. "Пути повышения производительности труда, сокращения сроков проектирования и строительства транспортных сооружений". М., ЦНИИС, 1986.

9. Строительные нормы и правила. Основания зданий и сооружений. СНиП 2.02.01-83. М., Стройиздат, 1985.

10. Строительные нормы и правила. Определение расчетных гидрологических характеристик. СНиП 2.01.14-83. М., Стройиздат, 1985.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ 3

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ 4

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКА 6

Глубины и скорости на выходе из труб 6

Расчет гидравлических характеристик потока на укреплении на основе математической модели 12

Расчет глубин, скоростей и ширины растекания потока на укреплении на основе эмпирических зависимостей 17

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ДНА В НИЖНИХ БЬЕФАХ ТРУБ 21

Характер деформаций и режимы протекания в размываемом логе 21

Максимальные глубины размыва 24

Глубина промоины в выходном логе 30

4. НАЗНАЧЕНИЕ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ ВЫХОДНЫХ РУСЛ 33

ПРИЛОЖЕНИЯ:

1. Графики для определения глубин на выходе из труб $h_{вых}$ и критических глубин $h_к$ в трубах . . . . . вклейка

2. Графики для определения нормальных глубин h_0 в технически гладких трубах . 38

3. Графики для определения скоростей $v_{вых}$ на выходе из круглых труб 41

4. Разностная сетка и примеры расчетов гидравлических характеристик потока в нижнем бьефе водопропускной трубы на основе математической модели 43

5. Графики для определения ширины растекания потока $B_{раст}$, глубин h и скоростей V потока на укреплении при уклоне выходного лога $i_л \geqslant 0,02$ 46

6. Расчет максимальной глубины размыва с учетом гидрографа паводка произвольной формы 51

7. Примеры расчета нижнего бьефа труб 53

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 68

Редактор Н.Э.Букова
Корректор О.Д.Сухова

Подп. к печ. 5.06.87. Л 77606 Заказ 346
Объем 4,5 п. л. Тираж 350 экз. Цена 68 коп.
Ротапринт ЦНИИСа

gost.e-ecolog.ru