

Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»  
(ННГАСУ)

Кафедра гидравлики

**Гидравлические расчеты водопропускных труб  
под дорожными насыпями**

Методические указания к практическим занятиям для студентов  
специальности 270205 – Автомобильные дороги и аэродромы  
по дисциплине «Гидравлика транспортных сооружений»

Нижний Новгород – 2011

УДК 625.712.02

Гидравлические расчеты водопропускных труб под дорожными насыпями. Методические указания. – Н.Новгород: Нижегород. гос. архит. – строит. ун-т, 2011. – 18 с.

В указаниях излагается методика гидравлического расчета водопропускных труб, являющихся наиболее распространенным типом искусственных сооружений в автомобильных и железных дорогах. Указания предназначены для использования на практических занятиях, а также при выполнении курсовых и дипломных проектов.

Составители: доц., к.т.н. Битюрин А.К., доц., к.т.н. Измайлов Р.Х.,

инженер Битюрин К.А.

Рецензент: доц., к.т.н. Жизняков В.В.

© Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 2011.

## Содержание

Введение .....	4
1. Цель гидравлических расчетов .....	4
2. Гидравлические расчеты_водопропускных труб .....	5
2.1. Классификация труб по условиям их гидравлической работы.....	5
2.2. Расчеты труб при безнапорном режиме работы.....	10
2.3. Расчеты труб при полупапорном режиме работы.....	13
2.4. Расчеты труб при напорном режиме работы.....	14
2.5. Расчеты нижнего бьефа труб.....	16
Литература.....	18

## **Введение**

Для пропуска воды на пересечениях водотоков с земляным полотном дорог устраиваются водопропускные сооружения, которые в зависимости от топографических, гидрологических, геологических и других условий могут быть различных типов.

К таким сооружениям относятся мосты, трубы, лотки, дюкеры, фильтрующие и переливные насыпи.

В настоящей методической разработке рассматриваются водопропускные трубы.

### **1. Цель гидравлических расчетов**

Основными нормативными документами при проектировании водопропускных сооружений являются строительные нормы и правила [1, 2] и свод правил [3].

Водопропускные сооружения рассчитываются на пропуск максимальных расчетных расходов определенной вероятности превышения. Вероятность превышения определяется СНиП 2.05.03-84\* [2] в зависимости от типа дороги (железная, автомобильная), типа сооружения (мост, труба), категории дороги (I, II...V).

В результате гидравлических расчетов должны быть установлены следующие параметры, определяющие основные размеры сооружений [4]:

а) наибольшая глубина перед сооружением, определяющая высоту дорожной насыпи;

б) глубина воды на входе и в сооружении, определяющие режим протекания и заполнения водовода;

в) глубина воды и скорость на выходе из сооружения, по которым назначаются размеры и тип укреплений на выходе;

г) глубина размыва в конце укреплений, по величине которой назначаются размеры конструкций водобойных элементов.

Требуемым гидравлическим и конструктивным условиям могут удовлетворять различные варианты водопропускных труб, отличающихся стоимостью. Оптимальный вариант сооружения должен устанавливаться технико-экономическим сопоставлением вариантов.

## 2. Гидравлические расчеты водопропускных труб

### 2.1. Классификация труб по условиям гидравлической работы

По гидравлической работе водопропускные трубы классифицируются:

1. **По условиям входа потока** различаются равнинные и косогорные трубы.

В *равнинных трубах* поток на входе находится в спокойном состоянии

$$F_r < 1, \quad (1)$$

где  $F_r$  – число Фруда

$$F_r = \frac{V_{ex}^2}{gh_{ex}}, \quad (2)$$

$V_{ex}$ ,  $h_{ex}$  – скорость и глубина потока на входе в сооружение;  $g$  – ускорение свободного падения.

Перед равнинным сооружением, как правило, формируется небольшой пруд, из которого вода поступает в трубу.

В *косогорных трубах* поток входит в бурном состоянии, т. е. при

$$F_r \geq 1. \quad (3)$$

Трубы, уложенные с уклонами  $i_{тр} \leq 0,02$ , можно отнести к равнинным. Трубы с уклоном  $i_{тр} > 0,02$  могут работать как равнинные и как косогорные в зависимости от входных условий. При отсутствии подходных быстотоков водопропускные трубы всегда работают как равнинные с образованием пруда перед сооружением.

2. **По характеру шероховатости** внутренней поверхности трубы:

- технические, гладкие (бетонные, железобетонные, чугунные и т.п.);
- гофрированные (металлические, пластиковые и т.п.).

3. **По влиянию длины** на пропускную способность:

- *короткие*, в которых длина не влияет на пропускную способность;
- *длинные*, в которых длина оказывает влияние на пропускную способность (рис. 1).

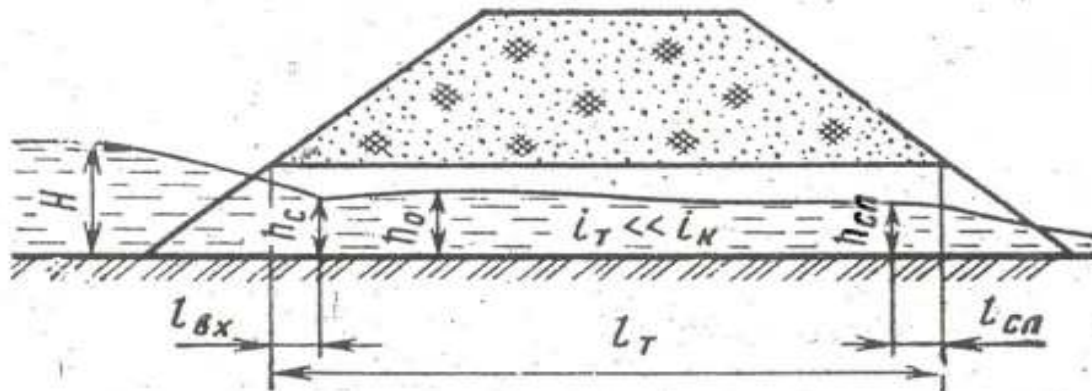


Рис. 1. Схема протекания воды в «длинной» трубе:

$H$  – напор перед трубой;  $h_c$  – глубина потока в сжатом сечении;  $h_0$  – нормальная глубина воды;  $h_{cl}$  – глубина воды в начале участка слива;  $l_{вх}$  – длина входного участка;  $l_T$  – длина трубы;  $l_{сл}$  – длина участка слива;  $i_T$  – уклон трубы;  $i_k$  – критический уклон.

Короткими считаются трубы, для которых соблюдается следующее условие

$$i_T \geq i_k, \quad (4)$$

где  $i_T$  – уклон трубы;  $i_k$  – критический уклон, который может быть определен по рис. 2 и рис. 3 [5].

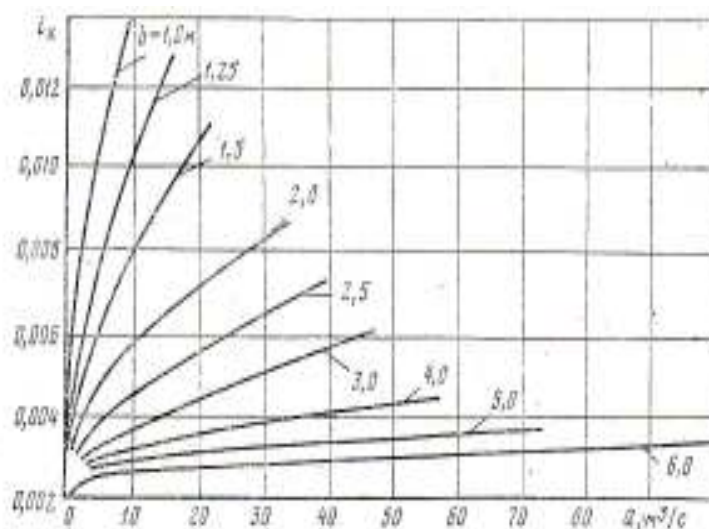


Рис. 2. Зависимость критического уклона  $i_k$  прямоугольной трубы от ее расхода  $Q$  и ширины  $b$

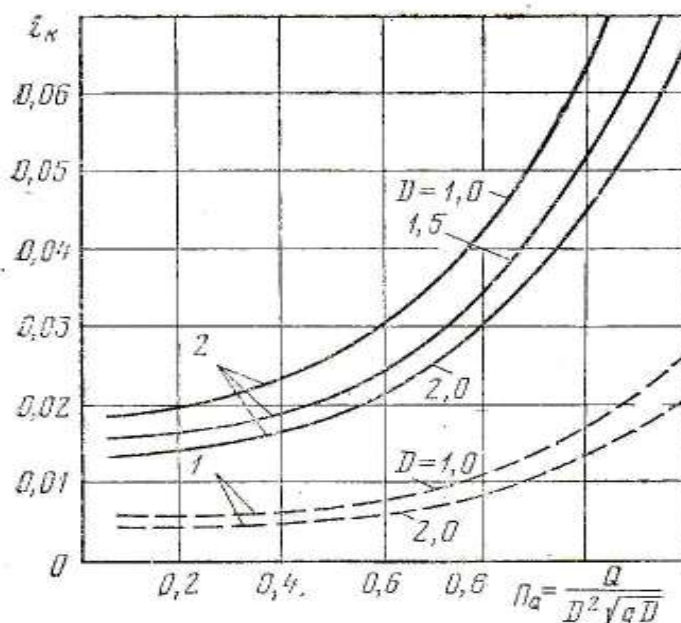


Рис. 3. Зависимость критического уклона  $i_k$  круглой трубы от параметра расхода  $\Pi_Q$  и ее диаметра  $D$ . Сплошными кривыми показаны зависимости для технически гладких труб, пунктирными – для гофрированных с гладким лотком ( $n=0,025$ )

При  $i_T < i_k$  можно с некоторым приближением считать, что *короткими* будут трубы при соблюдении критерия относительной длины [5]

$$\frac{l_T}{h_T} < 20, \quad (5)$$

где  $h_T$  – высота трубы.

**4. По влиянию глубины воды** в нижнем бьефе различаются трубы незатопленные и затопленные. При значительной бытовой глубине водотока происходит затопление труб со стороны нижнего бьефа, что снижает их пропускную способность.

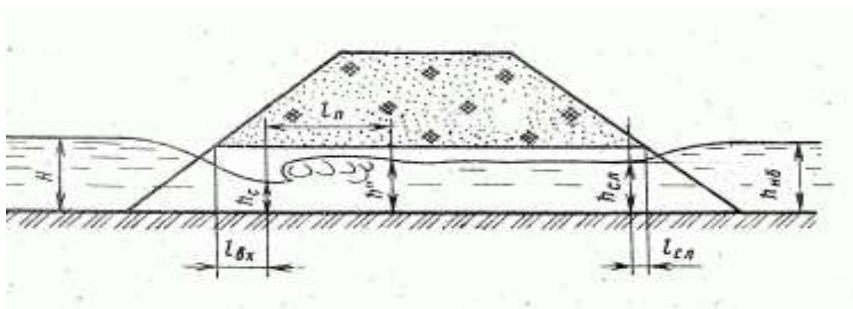


Рис. 4. Схема протекания воды по трубе, подтопленной с нижнего бьефа, с незатопленным сжатым сечением

$l_n$  – длина прыжка;  $h''$  – сопряженная глубина;  $h_{нб}$  – глубина воды в нижнем бьефе  $l_n$  – длина гидравлического прыжка.

Труба считается незатопленной при соблюдении следующих условий [4, 5, 6] (рис. 4):

$$h_{\text{нб}} \leq (1,20 \div 1,25) h_{\text{к}}, \quad (6)$$

$$h_{\text{нб}} \leq (0,75 \div 0,77) H, \quad (7)$$

где  $h_{\text{нб}}$  – глубина воды в нижнем бьефе;  $h_{\text{к}}$  – критическая глубина в трубе;  $H$  – напор перед трубой.

Критическая глубина  $h_{\text{к}}$  для прямоугольных и круглых труб может быть определена по графикам рис. 5, рис. 6 [5].

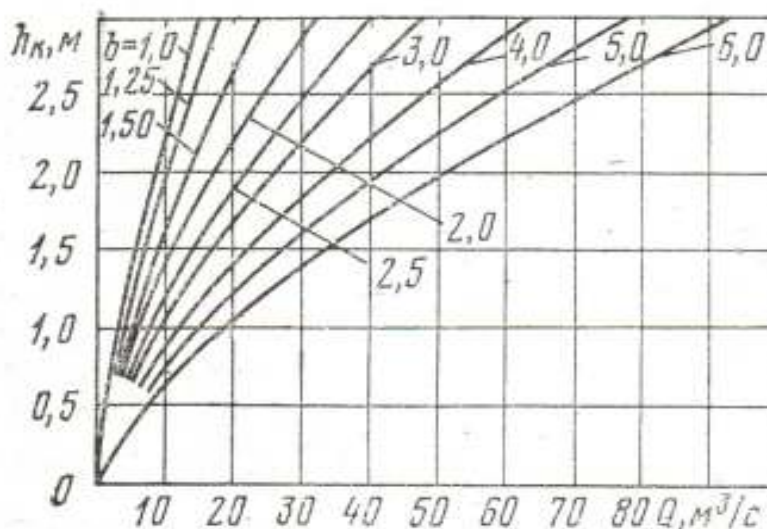


Рис. 5. Зависимость критической глубины  $h_{\text{к}}$  от расхода  $Q$  и ширины  $b$  прямоугольной трубы

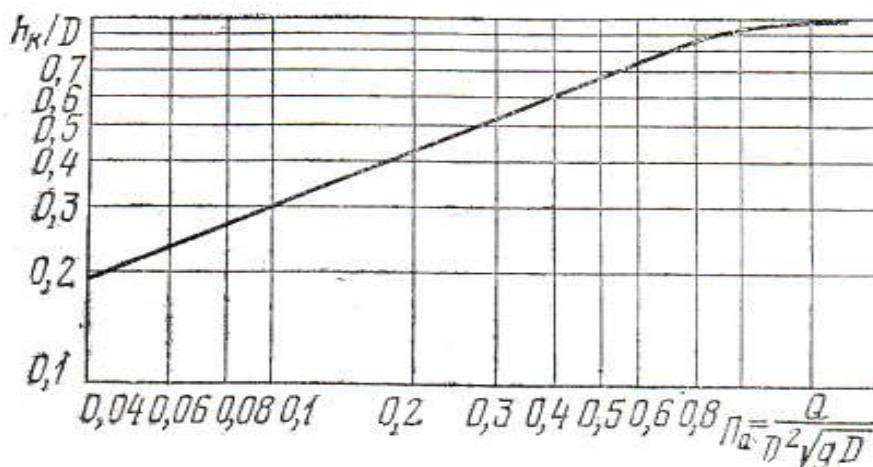
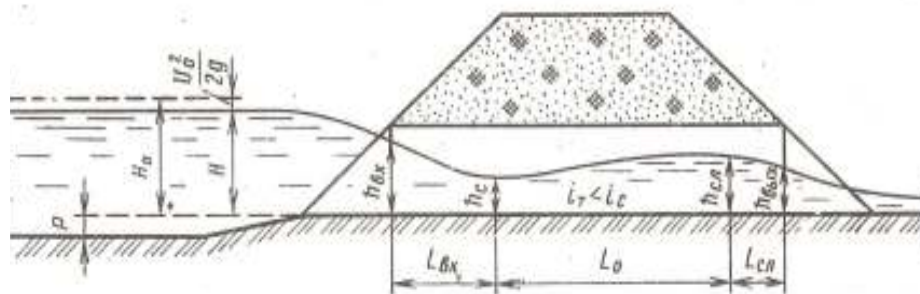


Рис. 6. Зависимость относительной критической глубины  $h_{\text{к}}/D$  круглой трубы от параметра расхода  $\Pi_Q$

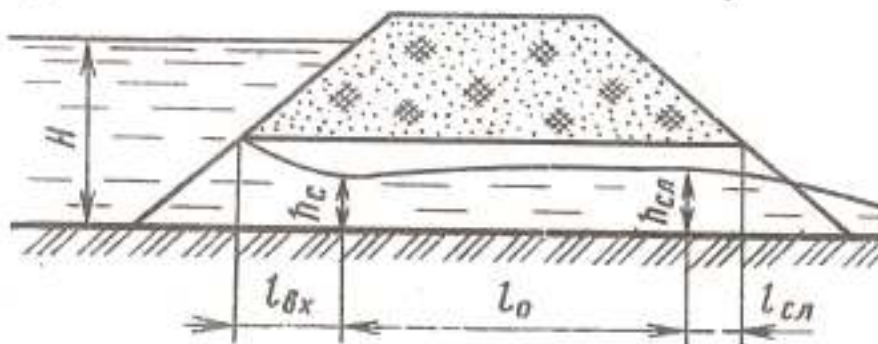


5. По режиму протекания потока трубы могут быть: безнапорные, полунанпорные, напорные.

а) при безнапорном режиме



б) при полунанпорном режиме



в) при напорном режиме

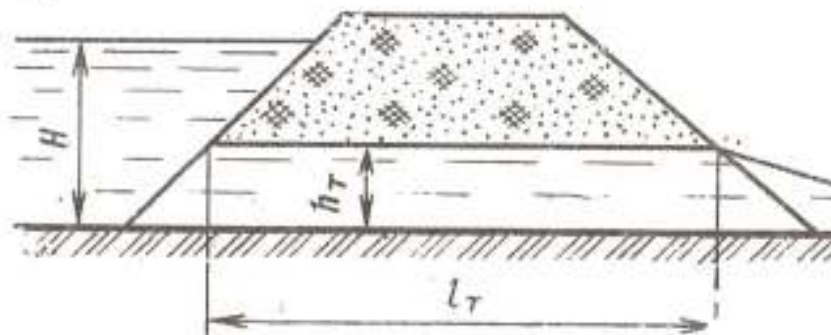


Рис. 7. Схемы протекания воды в трубах

*Безнапорный режим* - когда входное сечение не затоплено и на всем протяжении трубы поток имеет свободную поверхность (рис. 7а).

*Полунанпорный режим* - когда входное сечение затоплено, т.е. на входе труба работает полным сечением, а на остальном протяжении поток имеет свободную поверхность (рис. 7б).

*Напорный* режим - когда входное сечение трубы затоплено и на большей своей части труба работает полным сечением (рис. 7в).

Кроме этого, возможны *промежуточные* режимы, например, частично напорный, когда труба работает полным сечением лишь в части своей длины.

Несмотря на то, что в косогорных трубах возможны те же режимы протекания, их следует рассматривать особо из-за многообразия условий, влияющих на их возникновение [4].

## 2.2. Расчеты труб при безнапорном режиме работы

Безнапорный режим протекания потока сохраняется до полного заполнения входного сечения, что характеризуется следующими условиями [5, 6]:

$$\frac{h_{\text{вх}}}{h_T} < 1, \quad (8)$$

$$H \leq 1,2 h_T. \quad (9)$$

Пропускная способность безнапорных труб любой формы поперечного сечения определяется зависимостью [6]:

$$Q = m b_k \sqrt{2g} H_0^{3/2}, \quad (10)$$

где  $m$  – коэффициент расхода, принимаемый в зависимости от типа входного оголовка по таблице 1;

$b_k$  – средняя ширина потока в сечении с критической глубиной; для прямоугольных труб  $b_k$  равна ширине трубы, для круглых, овоидальных и лотковых  $b_k$  определяется по рис. 8 [4, 5].

$H_0$  - полный напор

$$H_0 = H + \frac{\alpha V_0^2}{2g}, \quad (11)$$

$\alpha$  – коэффициент Кориолиса, при расчете дорожных водопропускных труб может быть принят равным 1;  $V_0$  – скорость подхода воды к водопропускному сооружению. При расчете дорожных водопропускных сооружений скоростным напором пренебрегают и принимают  $H_0 = H$  [4].

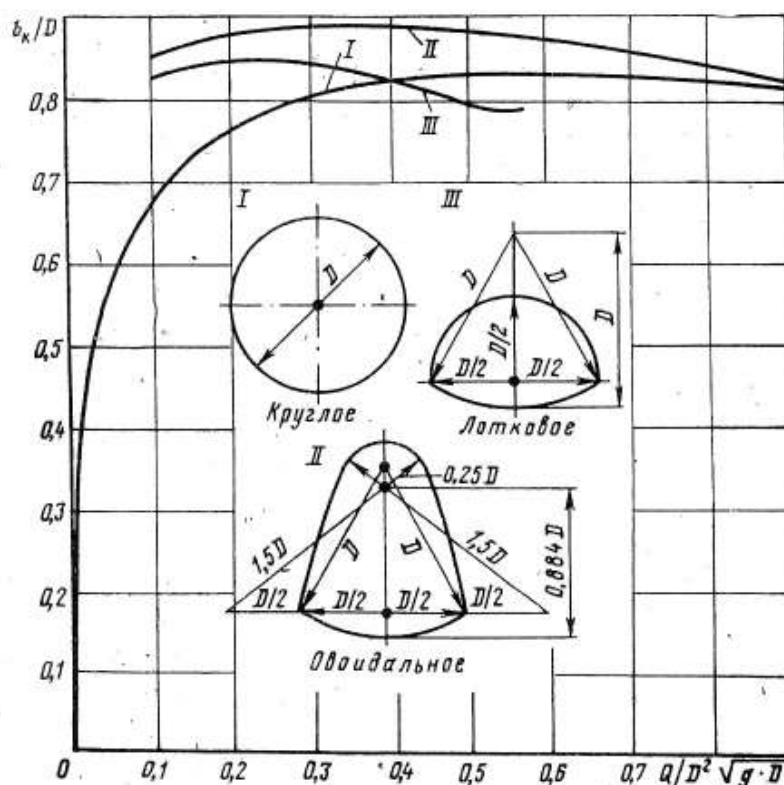


Рис. 8. График для определения средней ширины потока  $b_k$  в сечении с критической глубиной в трубах непрямоугольного сечения

Размеры безнапорных труб рассчитываются методом подбора по допускаемой скорости и предельной степени наполнения.

Возвышение высшей точки внутренней поверхности труб в любом поперечном сечении над поверхностью воды в трубе при максимальном расходе расчетного паводка должно быть: в круглых и сводчатых трубах высотой до 3,0 м – не менее 1/4 высоты трубы, свыше 3,0 м – не менее 0,75 м; в прямоугольных трубах высотой до 3,0 м – не менее 1/6 высоты трубы, свыше 3,0 м – не менее 0,5 м [2].-

Считается, что безнапорный режим работы водопропускных труб обеспечивает наибольшую надежность сооружения.

Глубина воды на входе в трубу  $h_{вх}$  (рис. 7а) [6]:

- для прямоугольных труб

$$\text{при } i_T < i_K \quad h_{вх} = 0,88H, \quad (12)$$

$$\text{при } i_T > i_K \quad h_{вх} = 0,85H; \quad (13)$$

- для круглых труб

с раструбными и порталными оголовками

$$h_{\text{вх}} = 0,9H, \quad (14)$$

с воротниковыми оголовкам

$$h_{\text{вх}} = 0,79H. \quad (15)$$

Для более точного определения глубины на входе в трубу могут быть использованы графики (рис. 9).

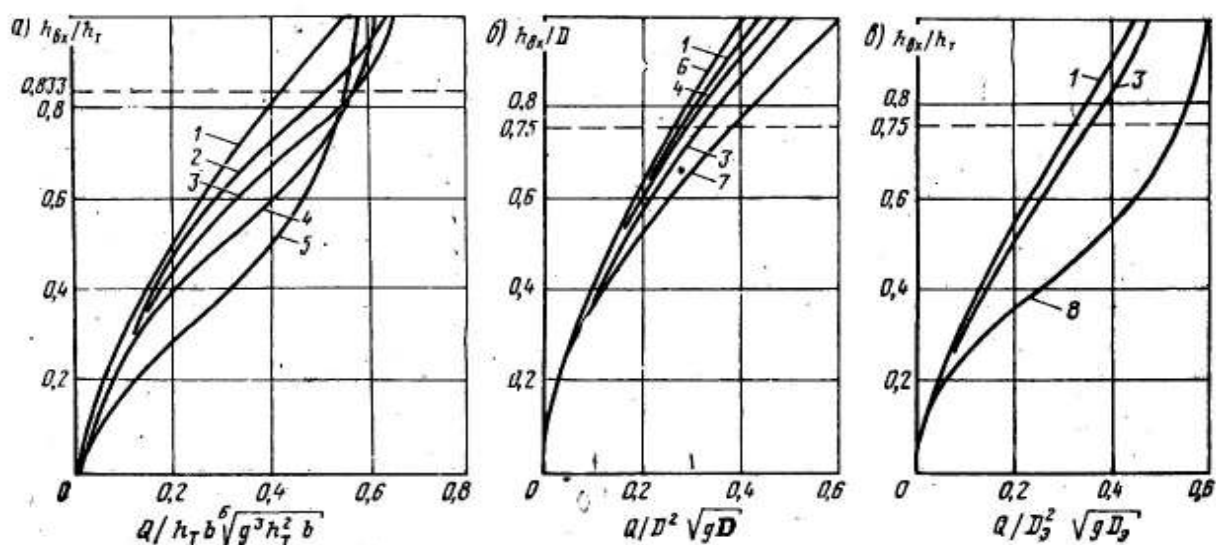


Рис. 9. Графики для определения глубины на входе в прямоугольные (а), круглые (б) и овоидальные (в) трубы при типах оголовков 1 – порталном; 2 – раструбном с  $\alpha_p=30\div45^\circ$ ; 3 – раструбном с  $\alpha_p=20^\circ$ ; 4 – раструбном с  $\alpha_p=10^\circ$ ; 5 – воротниковом с  $\alpha_p=0^\circ$ ; 6 – без оголовка; 7 – раструбном с коническим звеном; 8 – коридорном (штриховая линия характеризует расчетное заполнение трубы при  $h_T \leq 3,0$  м);  $\alpha_p$  – угол между осью трубы и открылком.

Графики на рис. 9 построены для уклона трубы  $i_T = 0,01$ . В диапазоне равнинных труб ( $i_T \leq 0,02$ ) при  $i_T \geq i_k$  глубина на входе  $h_{\text{вх}}$  практически не зависит от уклона, а при  $i=0$  при тех же параметрах расхода  $h_{\text{вх}}$  больше на величину, примерно равную 5% высоты трубы.

При безнапорном режиме перед трубой и в пределах входной части трубы наблюдается кривая спада от подпертой глубины до сжатого сечения. Сжатое сечение в зависимости от входного оголовка, поперечного сечения и уклона находится на расстоянии (рис. 7а)

$$l_{сж} = l_{вх} = (1,0 \div 2,0)H \quad (16)$$

от входа в трубу, а глубина в сжатом сечении находится в пределах [4]

$$h_c = (0,4 \div 0,7)H. \quad (17)$$

Форма свободной поверхности зависит от соотношения уклонов трубы  $i_T$ , критического  $i_k$  и уклона  $i_c$ , определяемого по формуле(18)[4]:

$$i_c = \frac{V_c^2}{C_c^2 R_c} \quad (18)$$

а) при  $i_T > i_c$ ,

от сжатой глубины  $h_c$  до глубины на выходе из трубы  $h_{вых}$  устанавливается пологая кривая спада;

б) при  $i_T = i_c$  за сжатым сечением устанавливается глубина  $h_c$ ;

в) при  $0 < i_T < i_c$  за сжатым сечением глубина увеличивается;

г) при  $i_T = i_k$  за сжатым сечением в трубе устанавливается критическая глубина  $h_k$ ;

д) при  $i_T > i_k$  глубина за сжатым сечением будет меньше  $h_k$ .

В практике проектирования по типовым проектам при определении степени заполнения трубы за сжатым сечением глубина принимается равной критической  $h_k$ .

### 2.3 Расчеты труб при полунапорном режиме работы

Пропускная способность полунапорных труб (рис. 7б) определяется зависимостью [4]:

$$Q = \mu_n \omega \sqrt{2g(H - \varepsilon_n h_T)} , \quad (19)$$

где  $\omega$  - площадь поперечного сечения трубы,  $\mu_n$ ,  $\varepsilon_n$ - соответственно коэффициент расхода и коэффициент сжатия при полунапорном режиме, определяемые по нижеследующей таблице [4, с. 118].

## Гидравлические характеристики водопропускных труб

Таблица 1

Форма поперечного сечения трубы	Расчетные коэффициенты	Гидравлические характеристики труб при типах входных оголовков						
		без оголовков	портальных с конусами	коридорных	воротниковых $\alpha_p=0^0$	раструбных с		
						$\alpha_p=10^0$	$\alpha_p=20^0$	$\alpha_p=30^0 \div 45^0$
Прямоугольная	$m$	0,310	0,325	0,340	0,315	0,36	0,36	0,35
	$\varepsilon_n$	0,86	0,74	0,83	0,740	0,76	0,78	0,81
	$\mu_n$	0,63	0,62	0,61	0,591	0,61	0,64	0,68
Круглая	$m$	0,31	0,31	0,32	0,31	0,33	0,33 (0,35)	0,33
	$\varepsilon_n$	0,66	0,79	0,79	0,75	0,79	0,79	0,79
	$\mu_n$	0,56	0,65	0,65	0,62	0,66	0,69	0,70
Овоидальная	$\varepsilon_n$	-	0,63	0,69	-	-	0,63	-
	$\mu_n$	-	0,60	0,58	-	-	0,61	-

Примечания. 1. В скобках дано значение  $m$  для труб с коническим звеном на входе.

2. Значения  $m$  для прямоугольных труб с раструбными оголовками соответствуют условиям  $\frac{H}{h_T} \leq 0,85$  при  $\alpha_p=10^0$  и  $\frac{H}{h_T} \leq 1,0$  при  $\alpha_p=20^0$ . В остальных случаях  $m$  следует определять по формулам: при  $\alpha_p=10^0$   $m=0,36-0,12 \left( \frac{H}{h_T} - 0,85 \right)$  и при  $\alpha_p=20^0$   $m=0,36-0,12 \left( \frac{H}{h_T} - 1,0 \right)$ .

В диапазоне уклонов равнинных труб влияние уклона трубы на пропускную способность незначительно: при увеличении уклона от 0 до 0,02 коэффициент расхода возрастает на 3% [4].

Малое влияние на пропускную способность оказывает и отношение высоты  $h_T$  к ширине  $b$  прямоугольных труб: при изменении  $h_T/b$  от 1 до 2 увеличение коэффициента расхода  $\mu_n$  не превышает 3%. В табл. 1 значения  $\mu_n$  приведены для уклона трубы  $i_T=0,01$  и  $h_T/b=1,5$  [4].

### 2.4. Расчеты труб при напорном режиме работы

Пропускная способность труб, не затопленных со стороны нижнего бьефа, определяется следующей зависимостью [4, 6]

$$Q = \mu_n \omega \sqrt{2g(H + i_T l_T - 0,85h_T)}, \quad (20)$$

где  $\mu_n$  - коэффициент расхода при напорном режиме, определяемый по формуле [4, 5]:

$$\mu_n = \sqrt{\frac{1}{1 + \zeta_{ex} + \zeta_{dl}}}, \quad (21)$$

$\zeta_{ex}$  - коэффициент сопротивления входа (для труб без оголовка  $\zeta_{ex} = 0,55$ ; для раструбных оголовков с  $\alpha_p = 10-20^\circ$   $\zeta_{ex} = 0,33$ ; для раструбных с коническим звеном  $\zeta_{ex} = 0,2$ );

$\zeta_{dl}$  - коэффициент сопротивления на трение по длине, определяемый по нижеследующим формулам.

*Для труб с любым поперечным сечением [5]:*

$$\zeta_{dl} = \frac{2gn^2(l_T - l_{ex})}{R^{4/3}} \quad (22)$$

где  $n$  - коэффициент шероховатости, для технических гладких труб  $n = 0,015$ ;  $l_{ex}$  - длина входного участка

$$l_{ex} = 3,6h_T, \quad (23)$$

$R$  - гидравлический радиус.

*Для круглых труб [5]:*

$$\zeta_{dl} = \frac{2gn^2(l_T - l_{ex})}{0,157D^{4/3}} \quad (24)$$

В случае затопленного выхода из трубы следует пользоваться зависимостью [6]:

$$Q = \mu_n \omega \sqrt{2g(H + i_T l_T - h_{нб})}, \quad (25)$$

где  $h_{нб}$  - глубина в нижнем бьефе над нижней точкой для трубы в выходном сечении (рис. 2).

Из формулы (25) подпертая глубина

$$H = \frac{Q^2}{2g\mu_n^2\omega^2} - i_T l_T + h_{нб} \quad (26)$$

## 2.5. Расчеты нижнего бьефа

Глубина на выходе из коротких незатопленных труб при безнапорном и полунапорном режимах [5]:

$$h_{вых} = k \cdot h_m \cdot (P_Q)^n, \quad (27)$$

где  $k$ ,  $n$  – эмпирический коэффициент и показатель степени, определяемые по таблице 2 [5];

$P_Q$  – параметр расхода:

для прямоугольных труб

$$P_Q = \frac{Q}{h_T b \sqrt{g h_T}}, \quad (28)$$

для круглых и овоидальных труб

$$P_Q = \frac{Q}{D^2 \sqrt{g D}} \quad (29)$$

### Значения $k$ и $n$

Таблица 2

Режим протекания	Тип труб	$k$	$n$
Безнапорный $P_Q \leq 0,6$	Круглая	0,75	1/2
	Прямоугольная	0,85	3/4
	Овоидальная	0,68	2/3
Полунапорный $P_Q > 0,6$	Круглая	0,70	1/3
	Прямоугольная	0,64	3/4
	Овоидальная	0,57	1/3

Формула (27) справедлива для  $i_T=0,01$ . При увеличении или уменьшении уклона ( $i_k < i_T < 0,03$ ) глубину на выходе следует соответственно уменьшать или увеличивать в случае безнапорного режима на  $0,03h_T$ , полунапорного – на  $0,04 h_T$  [5].

Скорость потока на выходе из безнапорных и полунапорных труб [5]:

Для круглых труб с обычными выходными звеньями



при безнапорном режиме

$$V_{\text{ВЫХ}} = (1,28 + 15i_T) \sqrt[3]{\frac{gQ}{D}}, \quad (30)$$

при полунапорном режиме

$$V_{\text{ВЫХ}} = \frac{1,65 + 8i_T}{D} \sqrt[3]{\frac{gQ}{D}} \quad (31)$$

Для круглых труб с коническими выходными звеньями

$$V_{\text{ВЫХ}} = (1,28 + 15i_T) \sqrt[3]{\frac{gQa\sqrt{a}}{D}}, \quad (32)$$

$$a = D_{\text{ВЫХ}}/D,$$

при напорном режиме

$$V_{\text{ВЫХ}} = \frac{1,41 + 4i_T}{D} \sqrt[4]{\frac{gQ^3 a^2}{D\sqrt{gD}}}, \quad (33)$$

Для прямоугольных труб при безнапорном режиме

$$V_{\text{ВЫХ}} = (1,13 + 5i_T) \sqrt[4]{\frac{gQ\sqrt{gh_T}}{b}}, \quad (34)$$

при полунапорном режиме

$$V_{\text{ВЫХ}} = (1,48 + 8i_T) \sqrt[4]{\frac{Q^3 \sqrt{gh_T}}{h_T^3 b^3}}, \quad (35)$$

## Литература

1. СНиП 2.05.02-85\*. Автомобильные дороги.
2. СНиП 2.05.03-84\*. Мосты и трубы.
3. СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик.
4. Пособие по гидравлическим расчетам малых водопропускных сооружений. – М.: Транспорт, 1992. – 408 с.
5. Водопропускные трубы под насыпями /Под ред. О.Я. Янковского. – М.: Транспорт, 1982. – 232 с.
6. Справочник по гидравлике/Под ред. В.А.Большакова. – Киев: Вища школа, 1984. – 343 с.
7. Киселев П.Г. Справочник по гидравлическим расчетам. – М. – Л.: Гос. энергетическое изд-во, 1957. – 352 с.

Битюрин Александр Константинович  
Битюрин Константин Александрович  
Измайлов Равиль Хамзович

## **Гидравлические расчеты водопропускных труб под дорожными насыпями**

Методические указания к практическим занятиям для студентов  
специальности 270205 – Автомобильные дороги и аэродромы  
по дисциплине «Гидравлика транспортных сооружений»

Подписано к печати \_\_\_\_\_. Бумага газетная  
Формат 60x90 1/16. Печать офсетная. Уч.- изд.л. \_\_\_\_\_.  
Усл. печ. л. \_\_\_\_\_ Тираж 100 экз. Заказ № \_\_\_\_\_.

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет,  
603600, Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65. Полиграфический центр ННГАСУ,  
603600, Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65.