РАСЧЁТ ОТВЕРСТИЯ ТРУБЫ

Суть расчетов заключается в определении глубины и скорости потока не выходе из трубы с целью назначения мероприятий по укреплению выходного русла.

В таблицах гидравлических характеристик типовых труб приведены значения скоростей и глубин в случае критического режима, т.е. $i_{тр} = i_{кр,}$ где $i_{тр}$ – уклон трубы, $i_{кр}$ – *критический уклон*. В зависимости от соотношения уклона трубы и критического уклона изменяется режим течения, а, следовательно, и выходные характеристики потока. Обычно трубы проектируют на безнапорный режим течения. Случаи, когда допускаются напорный и полунапорный режимы, указаны в СП 35.13330.2011 Мосты и трубы [1]. Типовые круглые железобетонные трубы имеют диаметры, приведённые в табл. 1. Типовые прямоугольные трубы имеют размеры b×h: 2,0×2,0; 2,5×2,0; 3,0×2,5; 4,0×2,5, где b и h – соответственно ширина и высота отверстия трубы в свету.

Алгоритм гидравлического расчета трубы следующий.

Сначала по таблицам пропускной способности, приведенным в приложении А к данным методическим материалам, подбирают в зависимости от расчетного максимального расхода размеры отверстия трубы. На их выбор также влияют длина трубы и климатические условия, поэтому при назначении размеров водопропускного отверстия следует учитывать требования из табл. 1 [1, 2].

Таблица 1 – Ограничения, учитываемые при назначении диаметра круглой трубы

Диаметр, м	Категория дороги	Длина трубы, м	Дополнительные условия
0,5	Съезды		При устройстве в пределах трубы быстротока с уклоном не менее 10‰ и ограждений на входе
0,75	III-V	До 15 м	Средняя температура наружного воздуха наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92 выше –40 ˚С
1,0	II	До 20 м	
	III-V	До 30 м	
1,25	I-V	Ограничений нет	
1,5	I-V	Ограничений нет	Ограничений нет
2,0			

Далее определяют *критическую глубину*[1] $h_{кр}$ с помощью уравнения

$$\frac{\omega_{кр}^3}{b_{кр} d^5} = \frac{\alpha Q_р^2}{g d^5} \quad , \tag{1}$$

где $\omega_{кр}$, $b_{кр}$ – соответственно площадь живого сечения и ширина потока поверху (свободной поверхности) при h=$h_{кр}$, $Q_р$ – расчетный максимальный расход воды, α – коэффициент Кориолиса, d – диаметр трубы, g – ускорение свободного падения. Сведения о гидравлической характеристике «*критическая глубина*» приведены в приложении Б к данным методическим материалам.

После сокращения на d^5 получится выражение

$$\frac{\omega_{кр}^3}{b_{кр}} = \frac{\alpha Q_р^2}{g} . \tag{2}$$

Коэффициент Кориолиса имеет значения в пределах от 1,0 до 1,1. В расчётах примем α=1,1.

Уравнение (2) представляет собой кривую связи между глубиной потока и расходом воды. Расчет по нему ведут графоаналитическим способом.

[1] *Критическая глубина потока* – глубина, при которой удельная энергия сечения достигает минимального значения.

1. Сначала строят таблицу (см. табл. 2), в которую заносят все возможные допустимые значения глубины водного потока h с шагом 0,1 или 0,2 м. Максимально допустимое значение глубины безнапорного потока воды в трубе $h_{пред}$ зависит от типа и размеров трубы [1]:

- в круглых трубах высотой до 3,0 м – $h_{пред} = 3/4d$;
- в круглых трубах высотой свыше 3,0 м – $h_{пред} = d$ - 0,75м;
- в прямоугольных высотой до 3,0 м – $h_{пред} = 5/6h_{тр}$;
- в прямоугольных высотой свыше 3,0 м – $h_{пред} = h_{тр}$ - 0,5м;

где d – диаметр круглой трубы, $h_{тр}$ – высота входного отверстия прямоугольной трубы.

Таблица 2 – Расчётная таблица

h, м	b, м	l, м	ω, м^2	ω^3/b, м^5
0,1				
0,2				
0,3				
…				
$h_{пред}$				

2. Для всех значений глубины h рассчитывают ширину потока по свободной поверхности b, смоченный периметр l, площадь живого сечения ω и отношение ω^3/b. Расчётные формулы приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Расчётные формулы для определения критической глубины

Параметр	Расчётные формулы		Номер формулы
	круглая труба	прямоугольная труба	
Ширина потока по свободной поверхности	Длина хорды: $b = 2\sqrt{hd - h^2}$	Ширина отверстия: b=const	(3)
Смоченный периметр	Длина дуги: $l = \sqrt{b^2 + \frac{16}{3}h^2}$.	$l=b+2h$	(4)
Площадь живого сечения	Площадь сегмента: $\omega = \frac{1}{2}\left(l\frac{d}{2} - b\left(\frac{d}{2} - h\right)\right)$	Площадь прямоугольника: $\omega=bh$	(5)

3. Далее строят график зависимости $h=h(\omega^3/b)$, представляющей собой кривую связи между расходом и глубиной воды в трубе.

4. По формуле (2) вычисляют значение $\frac{\omega_{кр}^3}{b_{кр}}$ и откладывают его по оси абсцисс.

5. С помощью построенного графика на оси ординат находят значение $h_{кр}$ (см. рис. 1).

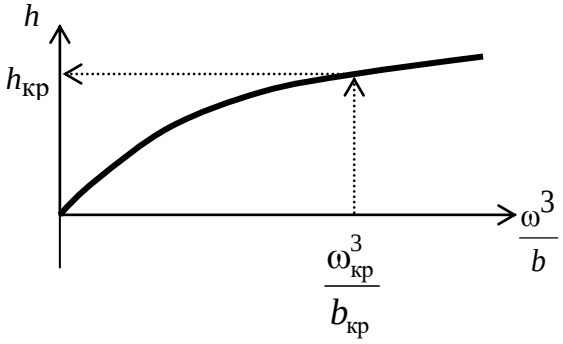


Рисунок 1 – Кривая связи между расходом и уровнем воды в трубе

На следующем этапе делают проверку, чтобы убедиться, что режим течения в трубе безнапорный. Для этого по приближенной формуле (6) задают глубину потока в сжатом сечении:

$$h_{сж} = 0{,}9h_{кр}. \quad (6)$$

Далее по формулам (3)–(5) находят ширину, смоченный периметр и площадь потока в сжатом сечении $b_{сж}$, $l_{сж}$,$\omega_{сж}$ соответственно.

Определяют напор перед трубой

$$H = h_{сж} + \frac{Q_p^2}{2g\varphi^2\omega_{сж}^2}, \quad (7)$$

где коэффициент скорости φ = 0,85. При безнапорном режиме течения должно выполняться условие:

$$H \le 1{,}2h_{тр}, \quad (8)$$

где $h_{тр}$ – высота (диаметр) входного отверстия трубы. Если проверка не выполняется, то следует увеличить размеры трубы или количество очков трубы и провести расчёты заново.

После этого находят *критический уклон*. Алгоритм следующий.

1. Для критической глубины $h_{кр}$ по формулам (3) – (5) находят ширину, смоченный периметр и площадь потока $b_{кр}$ $l_{кр}$,$\omega_{кр}$.

2. Определяют *гидравлический радиус*

$$R_{кр} = \frac{\omega_{кр}}{l_{кр}}. \quad (9)$$

3. Находят коэффициент гидравлической шероховатости – *коэффициент Шези́*

$$C_{кр} = \frac{R_{кр}^{1/6}}{n}, \quad (10)$$

где n – коэффициент шероховатости, принимаемый для бетонной поверхности трубы из диапазона 0,012–0,014 (для гофрированных труб 0,02).

4. Вычисляют критический уклон по формуле

$$i_{кр} = \frac{Q_р^2}{\omega_{кр}^2 C_{кр}^2 R_{кр}^2}. \quad (11)$$

Критический уклон необходим для того, чтобы определить режим течения в трубе. В зависимости от соотношения сил *инерции* и *тяжести* (гравитационных) состояние потока может быть *спокойным* (*докритическим*) и *бурным* (*сверхкритическим*). Не следует путать эти режимы с *ламинарным* и *турбулентным*, которые имеют место в зависимости от соотношения сил *инерции* и *вязкости*.

Режим течения в трубе зависит от соотношения уклонов (критического $i_{кр}$ и уклона трубы $i_{тр}$). Уклон трубы обычно принимают равным уклону лога перед сооружением, но он должен быть не меньше 5 ‰, чтобы был обеспечен сток воды. Поэтому

$$i_{тр} = \max\left(i_с; 5\right). \quad (12)$$

Если $i_{тр} \le i_{кр}$, то режим течения – *спокойный*, и соответственно скорость и глубина потока на выходе из трубы составят

$$v_{вых} = \frac{Q_р}{\omega_{сж}}, \quad (13)$$

$$h_{вых} = 0{,}8h_{кр} \ . \quad (14)$$

Если $i_{тр} > i_{кр}$, то режим течения – *бурный*, и соответственно скорость и глубина потока на выходе из трубы составят

$$v_{вых} = 1{,}21\frac{Q_р}{\omega_{сж}}, \quad (14)$$

$$h_{вых} = h_{сж} \ . \quad (15)$$

По найденным значениям скорости и глубины воды на выходе из трубы проектируют выходное русло за трубой.

Источники информации

1. СП 35.13330.2011 Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84* / Минво регионального развития Российской Федерации. – М., 2011. – 287 с.

2. СП 34.13330-2021. Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 2.05.02-85* : дата введения 2021-08-10. – Москва: Минстрой России, 2021. – 99 с.

3. Федотов, Г.А. Изыскания и проектирование автомобильных дорог. В 2-х кн. Кн. 1: Учебник / Г.А. Федотов, П.И. Поспелов. – М.: Высш. шк., 2009. – 646 с.

4. Проектирование переходов через водотоки: Методические указания к курсовой работе для студентов специальности 291000 «Автомобильные дороги и аэродромы» /Т.В. Гавриленко, П.В. Милашенко, Е.А. Иванова. – Красноярск: КрасГАСА, 2001. – 44с.

Приложение А

Таблица А.1– Гидравлические характеристики типовых круглых труб при безнапорном режиме протекания воды

Диаметр отверстия трубы, м	Тип входного оголовка трубы	Расход воды, $м^3/с$	Глубина воды перед трубой, м	Скорость воды на выходе из трубы, м/с
0,75	Портальный	0,20	0,41	1,40
		0,40	0,62	1,70
		0,60	0,79	2,00
		0,74	0,90	2,20
1,00	Раструбный с нормальным входным звеном	0,60	0,68	2,10
		0,80	0,81	2,30
		1,00	0,94	2,40
		1,20	1,05	2,60
		1,40	1,16	2,80
1,00	Раструбный с коническим входным звеном	0,80	0,57	1,40
		1,00	0,84	2,40
		1,40	1,03	2,70
		1,70	1,08	2,70
		2,00	1,31	3,30
		2,20	1,39	3,40
1,25	То же	1,00	0,77	2,20
		1,50	0,95	2,50
		2,00	1,13	2,70
		2,50	1,29	3,00
		3,90	1,74	3,80
		2,70	1,37	3,20
		3,00	1,46	3,30
		3,50	1,61	3,50
1,50	То же	2,50	1,19	2,90
		2,80	1,27	3,00
		3,00	1,32	3,00
		3,50	1,45	3,20
		3,90	1,54	3,30
		4,30	1,63	3,50
		4,70	1,75	3,70
		5,00	1,81	3,70
		6,00	2,08	4,10
2,0	То же	3,50	1,26	2,90

Окончание табл.А1

Диаметр отверстия трубы, м	Тип входного оголовка трубы	Расход воды, $м^3/с$	Глубина воды перед трубой, м	Скорость воды на выходе из трубы, м/с
2,00	То же	4,00	1,36	3,00
		4,50	1,47	3,20
		5,00	1,55	3,30
		5,50	1,65	3,40
		6,00	1,73	3,50
		6,50	1,81	3,60
		7,00	1,90	3,70
		7,50	1,98	3,80
		8,00	2,06	3,90
		8,50	2,14	4,00
		9,00	2,22	4,10
		9,70	2,32	4,20
		10,00	2,38	4,30
		10,50	2,46	4,30
		11,00	2,54	4,50
		12,50	2,78	4,80

Таблица А.2 –Гидравлические характеристики прямоугольных труб с нормальным входным звеном при безнапорном режиме протекания

Расход, $м^3/с$, при размерах отверстия трубы, м				Глубина воды перед трубой, м	Скорость воды на выходе из трубы, м/с
2,0 ×2,0	2,5 × 2,0	3,0 × 2,5	4,0 × 2,5		
1,00	1,25	1,50	2,00	0,45	1,80
2,00	2,50	3,00	4,00	0,71	2,30
3,00	3,75	4,50	6,00	0,94	2,70
4,00	5,00	6,00	8,00	1,13	2,90
5,00	6,25	7,50	10,00	1,32	3,20
6,00	7,50	9,00	12,00	1,48	3,40
7,00	8,75	10,50	14,00	1,66	3,50
8,00	10,00	12,00	16,00	1,82	3,90
9,00	11,25	13,50	18,00	1.97	4,10
10,00	12,50	15,00	20,00	2,11	4,20
11,00	13,75	16,50	22,00	2,27	4,40
12,00	15,75	18,90	25,20	2,49	4,60
14,00	17,50	21,00	28,00	2,65	4,70
15,00	18,75	22,50	30,00	2,77	4,80

Приложение Б

Понятие критической глубины

Уравнение Бернулли, выражающее закон сохранения энергии

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} \quad ,$$

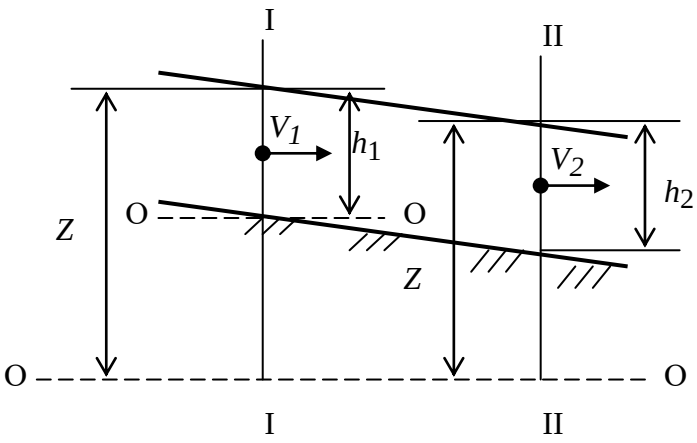


Рисунок Б.1 – Схема потока

где Z_1,Z_2 – высота положения жидкости относительно горизонтальной плоскости сравнения О – О в сечениях I-I и II-II соответственно; P_1,P_2 – гидродинамическое давление жидкости в сечениях I-I и II-II соответственно; γ – удельный вес воды; V_1,V_2 – скорости течения жидкости в сечениях I-I и II-II соответственно; g – ускорение свободного падения; α_1, α_2 – коэффициент скорости в сечениях I-I и II-II соответственно.

Удельная энергия потока:

$$e_1 = Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g}$$

Если плоскость сравнения О′-О′ провести через наинизшую точку сечения, то для сечения I-I, функция будет называться *удельной энергией сечения* и примет вид:

$$e_i = Z_i + \frac{P_i}{\gamma} + \frac{\alpha_i v_i^2}{2g} \quad ,$$

потенциальная кинетическая

При Q=const удельная энергия сечения зависит только от глубины потока, т.е. является функцией $e=f(h)$.

Глубина потока, при которой удельная энергия сечения достигает минимального значения, называется *критической*.

При $h>h_{кр}$ – поток спокойный; $h=h_{кр}$ – критический; $h<h_{кр}$ – бурный.

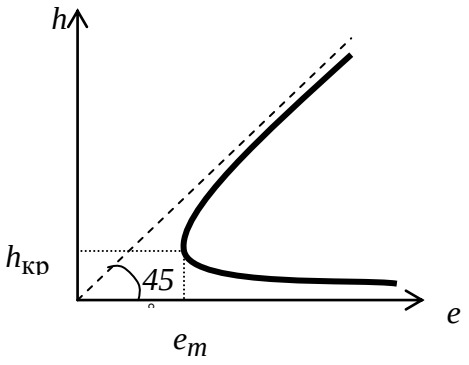


Рисунок Б.2 – График удельной энергии сечения