

### 3.2 РАСЧЕТ ОТВЕРСТИЯ ТРУБЫ

Суть расчетов заключается в определении глубины и скорости потока на 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 полунпорный режимы, указаны в СП 35.13330.2011 *Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84\** [1]. Типовые круглые железобетонные трубы имеют диаметры, приведённые в табл. 3.9. Типовые прямоугольные трубы имеют размеры  $b \times h$ : 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 данному конспекту, 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. 3.9 [1, 2].

Таблица 3.9 – Ограничения, учитываемые при назначении диаметра круглой трубы

| Диаметр, м | Категория дороги | Длина трубы, м  | Дополнительные условия                                                                              |
|------------|------------------|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0,5        | Съезды           |                 | При устройстве в пределах трубы быстотока 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 | Ограничений нет                                                                                     |
| 1,5        | I-V              | Ограничений нет |                                                                                                     |
| 2,0        |                  |                 |                                                                                                     |

Далее определяют *критическую глубину*<sup>1</sup>  $h_{кр}$  с помощью уравнения

$$\frac{\omega_{кр}^3}{b_{кр} \cdot d^5} = \frac{\alpha \cdot Q_p^2}{g \cdot d^5}, \quad (3.8)$$

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

После сокращения на  $d^5$  получится выражение

$$\frac{\omega_{кр}^3}{b_{кр}} = \frac{\alpha \cdot Q_{p, макс}^2}{g}. \quad (3.9)$$

Коэффициент Кориолиса имеет значения в пределах от 1,0 до 1,1. В расчетах примем  $\alpha=1,1$ .

<sup>1</sup> *Критическая глубина потока* – глубина, при которой удельная энергия сечения достигает минимального значения.

Уравнение (3.9) представляет собой кривую связи между глубиной потока и расходом воды. Расчет по нему ведут графоаналитическим способом.

1. Сначала строят таблицу (см. табл. 3.10), 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  $h_{\text{пред}}$  зависит от типа и размеров трубы [1]:

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

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

Таблица 3.10 – Расчетная таблица

| $h$ , м           | $b$ , м | $l$ , м | $\omega$ , м <sup>2</sup> | $\omega^3/b$ , м <sup>5</sup> |
|-------------------|---------|---------|---------------------------|-------------------------------|
| 0,1               |         |         |                           |                               |
| 0,2               |         |         |                           |                               |
| 0,3               |         |         |                           |                               |
| ...               |         |         |                           |                               |
| $h_{\text{пред}}$ |         |         |                           |                               |

2. Для всех значений глубины  $h$  рассчитывают ширину потока по свободной поверхности  $b$ , смоченный периметр  $l$ , площадь живого сечения  $\omega$  и отношение  $\omega^3/b$ . Расчетные формулы приведены в таблице 3.11.

Таблица 3.11 – Расчетные формулы для определения критической глубины

| Параметр                               | Расчётные формулы                                                                                           |                                          | Номер формулы |
|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|---------------|
|                                        | Круглая труба                                                                                               | Прямоугольная труба                      |               |
| Ширина потока по свободной поверхности | Длина хорды:<br>$b = 2\sqrt{hd - h^2}$                                                                      | Ширина отверстия:<br>$b = \text{const}$  | (3.10)        |
| Смоченный периметр                     | Длина дуги:<br>$l = \sqrt{b^2 + \frac{16}{3}h^2}$                                                           | $l = b + 2h$                             | (3.11)        |
| Площадь живого сечения                 | Площадь сегмента:<br>$\omega = \frac{1}{2} \left( l \frac{d}{2} - b \left( \frac{d}{2} - h \right) \right)$ | Площадь прямоугольника:<br>$\omega = bh$ | (3.12)        |

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

4. По формуле (3.9) вычисляют значение  $\frac{\omega_{\text{кр}}^3}{b_{\text{кр}}}$  и откладывают его по оси абсцисс.

5. С помощью построенного графика на оси ординат находят значение  $h_{\text{кр}}$  (см. рис. 3.5).

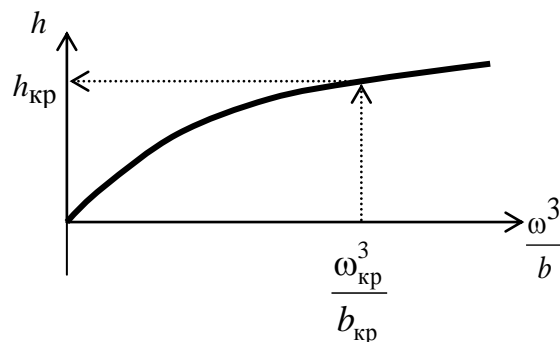


Рисунок 3.5 – Кривая связи между расходом и уровнем воды в трубе

На следующем этапе делают проверку, чтобы убедиться, что режим течения в трубе безнапорный. Для этого по приближенной формуле (3.13) задают глубину потока в сжатом сечении:

$$h_{сж} = 0,9h_{кр}. \quad (3.13)$$

Далее по формулам (3.10) – (3.12) находят ширину, смоченный периметр и площадь потока в сжатом сечении  $b_{сж}$ ,  $l_{сж}$ ,  $\omega_{сж}$  соответственно.

Определяют напор перед трубой

$$H = h_{сж} + \frac{Q_p^2}{2g\varphi^2\omega_{сж}^2}, \quad (3.14)$$

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

$$H \leq 1,2h_{тр}, \quad (3.15)$$

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 (3.10) – (3.12) находят ширину, смоченный периметр и площадь потока  $b_{кр}$ ,  $l_{кр}$ ,  $\omega_{кр}$ .

2. Определяют *гидравлический радиус*

$$R_{кр} = \frac{\omega_{кр}}{l_{кр}}. \quad (3.16)$$

3. Находят коэффициент гидравлической шероховатости – *коэффициент Шези*

$$C_{кр} = \frac{R_{кр}^{1/6}}{n}, \quad (3.17)$$

где  $n$  – коэффициент шероховатости, принимаемый для бетонной поверхности трубы из диапазона  $0,012 \div 0,014$ .

4. Вычисляют критический уклон по формуле

$$i_{кр} = \frac{Q_p^2}{\omega_{кр}^2 \cdot C_{кр}^2 \cdot R_{кр}^2}. \quad (3.18)$$

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  $i_{тр}$ . В качестве уклона трубы принимают уклон дна бассейна перед сооружением.

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

$$v_{вых} = \frac{Q_p}{\omega_{сж}}, \quad (3.19)$$

$$h_{вых} = 0,8h_{кр}. \quad (3.20)$$

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

$$v_{\text{ВЫХ}} = 1,21 \frac{Q_p}{\omega_{\text{сж}}}, \quad (3.21)$$

$$h_{\text{ВЫХ}} = h_{\text{сж}}. \quad (3.22)$$

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\* / Мин-во регионального развития Российской Федерации. – М., 2011. – 287 с.
2. СП 34.13330.2012 Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 2.05.02-85\* / Мин-во регионального развития Российской Федерации. – М., 2013. – 139 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.

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

| Диаметр отверстия трубы, м | Тип входного оголовка трубы            | Расход воды, м <sup>3</sup> /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 <sup>3</sup> /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 <sup>3</sup> /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                                  |

### Понятие критической глубины

Уравнение Бернулли, выражающее закон сохранения энергии

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

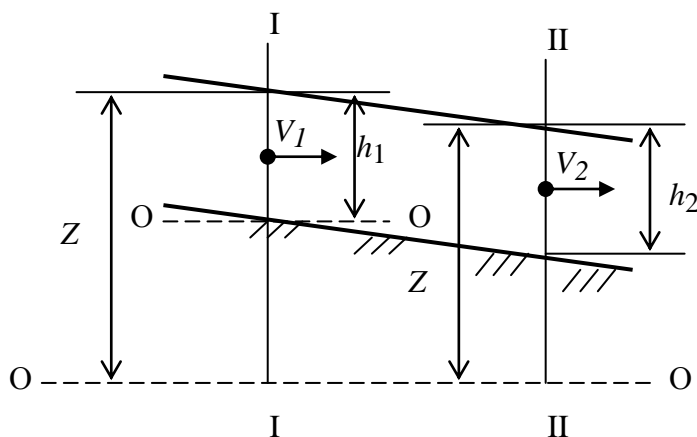


Рисунок Б.1 – Схема потока

где  $Z_1, Z_2$  – высота положения жидкости относительно горизонтальной плоскости сравнения  $O - O'$  в сечениях I-I и II-II соответственно;  $P_1, P_2$  – гидродинамическое давление жидкости в сечениях I-I и II-II соответственно;  $\gamma$  – удельный вес воды;  $V_1, V_2$  – скорости течения жидкости в сечениях I-I и II-II соответственно;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\alpha_1, \alpha_2$  – 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  $O'-O'$  провести через наинизшую точку сечения, то для сечения I-I, функция будет называться *удельной энергией сечения* и примет вид:

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



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.

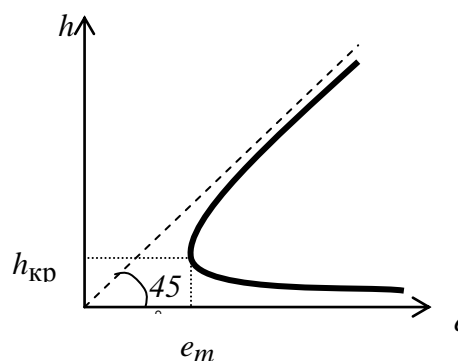


Рисунок Б.2 – График удельной энергии сечения