

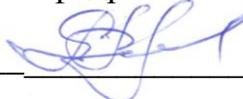
МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Тульский государственный университет»

Институт горного дела и строительства  
Кафедра «Санитарно-технические системы»

Утверждено на заседании кафедры  
«Санитарно-технические системы»  
«20» января 2023 г., протокол № 5

Заведующий кафедрой



Р.А. Ковалев

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**  
по проведению практических (семинарских) занятий  
по дисциплине (модулю)  
«Инженерная гидравлика»

**основной профессиональной образовательной программы  
высшего образования – программы бакалавриата**

по направлению подготовки  
**08.03.01 – "Строительство"**

с профилем  
**"Водоснабжение и водоотведение"**

Форма(ы) обучения: очная, очно-заочная

Идентификационный номер образовательной программы: 080301-02-23

Тула 2023 год

**Разработчик(и) методических указаний**

Белоусов Р.О., доцент, к.т.н., доцент  
(*ФИО, должность, ученая степень, ученое звание*)



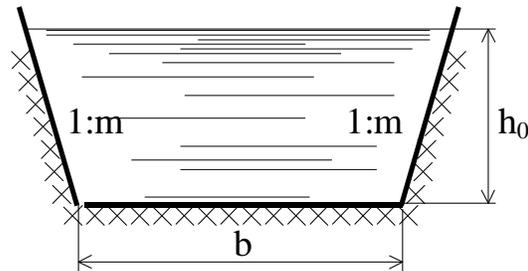
---

(подпись)

## Расчет открытых потоков

(Прямая задача расчета призматических каналов, Обратные задачи расчета призматических каналов, Определение гидравлически наивыгоднейшего сечения канала)

Задача 1.



Вода из поверхностного источника к очистным сооружениям подается по каналу трапецеидального сечения с шириной по дну  $b$ , продольным уклоном  $i_0$  и коэффициентом заложения откоса  $m$ . Дно и откосы канала имеют искусственное крепление с коэффициентом шероховатости  $n$ . При пропуске расхода  $Q$  при равномерном движении воды в канале устанавливается нормальная глубина  $h_0$ .

Известно, что  $b = 2,5$  м,  $m = 1$ ,  $i_0 = 0,0009$ . Крепление дна и стенок канала - бетонировка в средних условиях. Определить нормальную глубину потока  $h_0$  при пропуске расхода  $Q = 3,8$  м<sup>3</sup>/с

### Решение

Расходная характеристика сечения потока при равномерном движении ([3], с.176; [4], с.240)

$$K_0 = \frac{Q}{\sqrt{i_0}} = \frac{3,8}{\sqrt{0,0009}} = 126,7 \text{ м}^3/\text{с}$$

При креплении дна и стенок канала бетонировкой в средних условиях:

Коэффициент шероховатости  $n = 0,014$  ([2], табл. 7.1).

Расчёт выполним графоаналитическим методом.

Принимаем в первом приближении  $h_0^{(1)} = 1$  м.

Тогда:

- площадь живого сечения

$$\omega = (b + mh)h = (2,5 + 1 \times 1) \times 1 = 3,5 \text{ м}^2$$

- смоченный периметр

$$\chi = b + 2h\sqrt{1+m^2} = 2,5 + 2 \times 1 \times \sqrt{1+1^2} = 5,33 \text{ м}$$

- гидравлический радиус

$$R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{3,5}{5,33} = 0,656 \text{ м}$$

- коэффициент Шези

$$C = \frac{1}{n} R^y = \frac{1}{0,014} \times 0,656^{1,5 \sqrt{0,014}} = 66,2 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$$

- расходная характеристика

$$K^{(1)} = \omega C \sqrt{R} = 3,5 \times 66,2 \times \sqrt{0,656} = 188 \text{ м}^3/\text{с}$$

$(K^{(1)} > K^0)$

Принимаем во втором приближении  $h_0^{(2)} = 0,5 \text{ м}$ .

Тогда:

$$\omega = (2,5 + 1 \times 0,5) \times 0,5 = 1,5 \text{ м}^2$$

$$\chi = 2,5 + 2 \times 0,5 \times \sqrt{1 + 1^2} = 3,91 \text{ м}$$

$$R = \frac{1,5}{3,91} = 0,384 \text{ м}$$

$$C = \frac{1}{0,014} \times 0,384^{1,5 \sqrt{0,014}} = 60,27 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$$

$$K^{(2)} = 1,5 \times 60,27 \times \sqrt{0,384} = 56,02 \text{ м}^3/\text{с} \quad (K^{(2)} < K^0)$$

Принимаем в третьем приближении  $h_0^{(3)} = 0,75 \text{ м}$ .

Тогда:

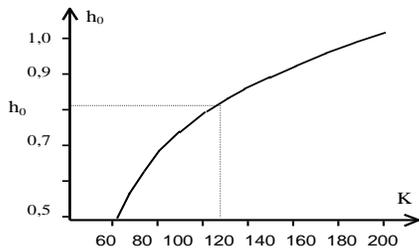
$$\omega = (2,5 + 1 \times 0,75) \times 0,75 = 2,44 \text{ м}^2$$

$$\chi = 2,5 + 2 \times 0,75 \times \sqrt{1 + 1^2} = 4,62 \text{ м}$$

$$R = \frac{2,44}{4,62} = 0,526 \text{ м}$$

$$C = \frac{1}{0,014} \times 0,526^{1,5 \sqrt{0,014}} = 63,8 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$$

$$K^{(3)} = 2,44 \times 63,8 \times \sqrt{0,526} = 113 \text{ м}^3/\text{с} \quad (K^{(3)} < K_0)$$



Строим вспомогательный график  $K = f(h)$ .

Из графика при  $K_0 = 126,7 \text{ м}^3/\text{с}$  получаем искомую глубину потока  $h_0 = 0,81 \text{ м}$ .

Проверка:

$$\omega = (2,5 + 1 \times 0,81) \times 0,81 = 2,68 \text{ м}^2$$

$$\chi = 2,5 + 2 \times 0,81 \times \sqrt{1 + 1^2} = 4,79 \text{ м}$$

$$R = \frac{2,68}{4,79} = 0,56 \text{ м}$$

$$C = \frac{1}{0,014} \times 0,56^{1,5 \sqrt{0,014}} = 64,3 \text{ м}^{0,5}/\text{с} \quad K = 2,68 \times 64,3 \times \sqrt{0,56} = 129 \text{ м}^3/\text{с}$$

Ошибку ,

$$\alpha = \frac{K_0 - K}{K_0} \times 100 = \frac{126,7 - 129}{126,7} \times 100 = 1,82 \% ,$$

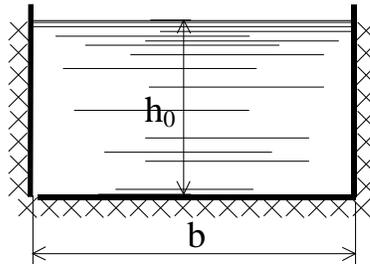
считаем допустимой.

## В а р и а н т ы з а д а ч и

1. Известно, что  $m = 1,5$ ,  $i_0 = 0,001$ ,  $Q = 4,5 \text{ м}^3/\text{с}$ . Крепление откосов и дна — облицовка из тесаного камня. Определить ширину канала по дну  $b$ , при которой глубина потока в канале  $h_0 = 1 \text{ м}$ .

2. Известно, что  $b = 2,0 \text{ м}$ ,  $m = 2$ ,  $i_0 = 0,002$ . Крепление откосов - хорошая бутовая кладка. Определить пропускную способность канала  $Q$  при глубине потока  $h_0 = 1,5 \text{ м}$ .

### Задача 2



Вода от очистных сооружений сбрасывается в реку по каналу прямоугольного сечения шириной  $b$  и продольным уклоном  $i_0$ . Боковые стенки и дно канала имеют искусственное крепление с коэффициентом шероховатости  $n$ . При пропуске расхода  $Q$  со скоростью  $V$  в канале устанавливается нормальная глубина  $h_0$ .

Известно, что  $Q = 4 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $i_0 = 0,001$ . Крепление канала - оштукатуривание цементным раствором. Какова должна быть ширина канала  $b$ , чтобы глубина  $h_0 = 1,0 \text{ м}$ .

### Р е ш е н и е

Расходная характеристика сечения потока при равномерном движении ([3], с.176; [4], с.240)

$$K_0 = \frac{Q}{\sqrt{i_0}} = \frac{4}{\sqrt{0,001}} = 126,5 \text{ м}^3/\text{с}$$

При креплении дна и откосов русла оштукатуриванием цементным раствором

коэффициент шероховатости  $n = 0,013$  ([2], табл. 7.1).

Расчет ведем графоаналитическим методом.

Принимаем в первом приближении  $b^{(1)} = 1$  м.

Тогда:

- площадь живого сечения

$$\omega^{(1)} = bh_0 = 1 \times 1 = 1 \text{ м}^2$$

- смоченный периметр

$$\chi^{(1)} = b + 2h = 1 + 2 \times 1 = 3 \text{ м}$$

- гидравлический радиус

$$R^{(1)} = \frac{\omega^{(1)}}{\chi^{(1)}} = \frac{1}{3} = 0,33 \text{ м}$$

- коэффициент Шези

$$C = \frac{1}{n} R^y = \frac{1}{0,014} \times 0,656^{1,5 \sqrt{0,014}} = 66,2 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$$

- расходная характеристика

$$K^{(1)} = w^{(1)} C^{(1)} \sqrt{R^{(1)}} = 1 \times 63,64 \times \sqrt{0,33} = 35,5 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$(K^{(1)} = 35,5 < K_0 = 126,5)$$

Принимаем во втором приближении  $b^{(2)} = 2$  м.

Тогда:

$$\omega^{(2)} = 2 \times 1 = 2 \text{ м}^2$$

$$\chi^{(2)} = 2 + 2 \times 1 = 4 \text{ м}$$

$$R^{(2)} = \frac{2}{4} = 0,5 \text{ м}$$

$$C^{(2)} = \frac{1}{0,013} \times 0,5^{1,5 \sqrt{0,013}} = 68,3 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$$

$$K^{(2)} = 2 \times 68,3 \times \sqrt{0,5} = 96,5 \text{ м}^3/\text{с} \quad (K^{(2)} < K_0)$$

Принимаем в третьем приближении  $b^{(3)} = 2,5$  м.

Тогда:

$$\omega^{(3)} = 2,5 \times 1 = 2,5 \text{ м}^2$$

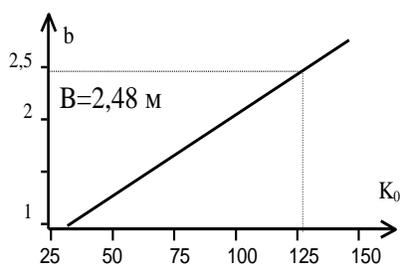
$$\chi^{(3)} = 2,5 + 2 \times 1 = 4,5 \text{ м}$$

$$R^{(3)} = \frac{2,5}{4,5} = 0,55 \text{ м}$$

$$C^{(3)} = \frac{1}{0,013} \times 0,55^{1,5 \sqrt{0,013}} = 69,4 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$$

$$K^{(3)} = 2,5 \times 69,4 \times \sqrt{0,55} = 128,7 \text{ м}^3/\text{с} \quad (K^{(3)} > K^0)$$

Строим вспомогательный график  $K = f(b)$ .



Из графика находим искомую ширину канала при  $K_0 = 126,5$   $b = 2,48$  м.

Проверка:

$$\omega = 2,48 \cdot 1 = 2,48 \text{ м}^2$$

$$\chi = 2,48 + 2 \cdot 1 = 4,48 \text{ м}$$

$$R = \frac{2,48}{4,48} = 0,55 \text{ м}, C = 69,4 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$$

$$K = 2,48 \times 69,4 \times \sqrt{0,55} = 127,6 \text{ м}^3/\text{с}$$

Ошибка ,

$$\alpha = \frac{127,6 - 126,5}{127,6} \times 100 = 0,86 \% ,$$

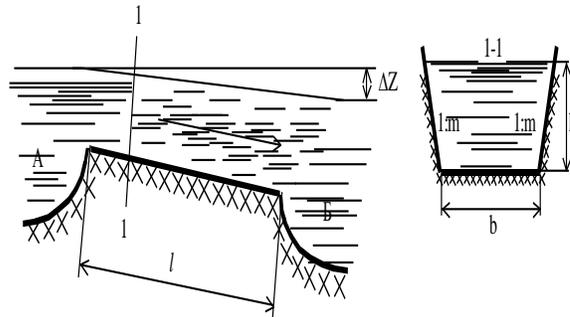
которую считаем допустимой (меньше 5%)

### В а р и а н т ы з а д а ч и

1. Известно, что  $Q = 5 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $i_0 = 0,002$ . Крепление канала - бетонировка в средних условиях. Определить, какова будет глубина потока  $h_0$ , если ширина его  $b = 2,5 \text{ м}$ .

2. Известно, что  $Q = 2 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $i_0 = 0,003$ ,  $b = 1,5 \text{ м}$ . Крепление канала - хорошая бетонировка. Определить, равномерным ли является течение, если глубина  $h_0 = 2 \text{ м}$ .

Задача 3.



Уровни воды в водоемах  $A$  и  $B$  имеют разницу отметок  $\Delta z$ . Они соединены между собой каналом гидравлически наивыгоднейшего сечения трапецеидальной формы с заложением откосов  $m$  и шириной по дну  $b$ . Глубина воды в канале  $h$ , длина канала  $l$ . Стенки и дно канала укреплены бетоном ( $n = 0,012$ ). При равномерном движении расход воды в канале  $Q$ .

Известно, что  $Q = 25 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $l = 4000 \text{ м}$ ,  $\Delta z = 2,8 \text{ м}$ . Определить размеры сечения потока  $h$  и  $b$ , если  $m = 1,5$ .

## Решение

Гидравлический уклон потока

$$i = \frac{\Delta z}{l} = \frac{2.8}{4000} = 0.0007$$

Расходная характеристика сечения потока при равномерном движении ([3], с.176; [4], с.240)

$$K_0 = \frac{Q}{\sqrt{i}} = \frac{25}{\sqrt{0.0007}} = 944,91 \text{ м}^3/\text{с}$$

Для гидравлически наивыгоднейшего сечения канала трапецеидальной формы ([2], с.198; [4], с.245)

- ширина по дну

$$b = 2(\sqrt{1+m^2} - m)h = 2(\sqrt{1+1,5^2} - 1,5)h = 0,605h$$

- площадь живого сечения

$$\omega = (b+mh)h = (0,605h+1,5h)h = 2,105h^2$$

- гидравлический радиус  $R = 0,5h$

Расчет ведем графоаналитическим методом. В первом приближении примем  $H^{(1)} = 1 \text{ м}$ .

Тогда:

- гидравлический радиус  $R^{(1)} = 0,5 \times 1 = 0,5 \text{ м}$

- коэффициент Шези

$$C^{(1)} = \frac{1}{n} R^{1,5\sqrt{n}} = \frac{1}{0,012} \times 0,5^{1,5\sqrt{0,012}} = 74,37 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$$

- расходная характеристика

$$K^{(1)} = \omega^{(1)} C^{(1)} \sqrt{R^{(1)}} = 2,105 \times 1^2 \times 74,37 \times \sqrt{0,5 \times 1} = 110,7 \text{ м}^3/\text{с}$$

Так как  $K^{(1)} = 110,7 < K_0 = 944,91$ , примем во втором приближении большее значение  $h^{(2)} = 2 \text{ м}$ .

Тогда:

$$R^{(2)} = 0,5 \times 2 = 1 \text{ м}$$

$$C^{(2)} = 83,3 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$$

$$K^{(2)} = 2,105 \times 2^2 \times 83,33 \times \sqrt{0,5 \times 2} = 701,63 \text{ м}^3/\text{с} \quad (K^{(2)} < K_0)$$

В третьем приближении принимаем  $h^{(3)} = 2,5 \text{ м}$ .

$$R^{(3)} = 0,5 \times 2,5 = 1,25 \text{ м}$$

$$C^{(3)} = \frac{1}{0,012} \times 2,5^{1,5\sqrt{0,012}} = 86,02 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$$

Построим вспомогательный

По графику при находим  $h = 2,3 \text{ м}$ .

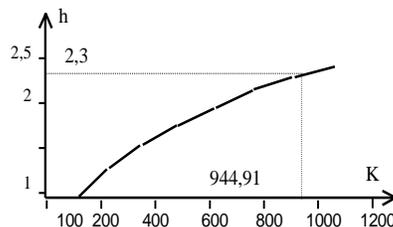


график  $K = f(h)$ .

$$K_0 = 944,91 \text{ м}^3/\text{с}$$

Проверка :

$$R=0,5 \times 2,3=1,15 \text{ м}$$

$$C=\frac{1}{0,012} \times 1,15^{1,5 \sqrt{0,012}}=85,0 \text{ м}^{0,5}/\text{с}$$

$$K=2,105 \times 2,3^2 \times 85 \times \sqrt{0,5 \times 2,3}=1015 \text{ м}^3/\text{с}$$

Ошибку ,

$$\alpha=\frac{K-K_0}{K_0} \times 100=\frac{1015-944,91}{1015} \times 100=6,9 \% ,$$

считаем допустимой. В противном случае необходимо более точно построить кривую  $K = f(h)$ .

Искомая ширина канала по дну

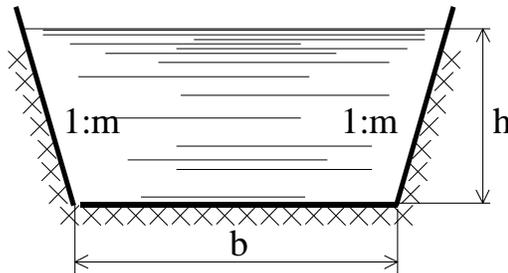
$$b=0,605 \times h=0,605 \times 2,3=1,39 \text{ м}$$

## В а р и а н т ы з а д а ч и

1. Известно, что  $Q = 20 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $l = 5000 \text{ м}$ ,  $\Delta z = 3,5 \text{ м}$ . Определить ширину канала по дну  $b$ , если коэффициент заложения  $m = 2$ .

2. Известно, что  $Q = 22 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $l = 4500 \text{ м}$ ,  $\Delta z = 3,2 \text{ м}$ . Определить глубину потока  $h$ , если коэффициент заложения  $m = 1,75$ .

### Задача 2



Для отвода воды в количестве  $Q$  устроен лоток из струганных досок ( $n = 0,011$ ) сечением трапецидальной формы с коэффициентом заложения бортов лотка  $m$  и продольным уклоном  $i_0$ . Ширина лотка по дну  $b$ . Глубина воды  $h$  подбирается так, чтобы сечение было гидравлически наиболее выгодным.

Известно, что  $Q = 0,5 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $m = 1$ , Определить размеры  $h$ ,  $b$  и продольный уклон  $i_0$  лотка о том, чтобы средняя скорость  $V = 4 \text{ м/с}$ .

## Р е ш е н и е

Площадь сечения потока в лотке при заданной скорости

$$\omega = \frac{Q}{V} = \frac{0,5}{4} = 0,125 \text{ м}^2.$$

Для гидравлически наивыгоднейшего сечения ([2], с.198; [4], с.245)

- ширина по дну лотка

$$b = 2\left(\sqrt{1+m^2} - m\right)h = 2\left(\sqrt{1+1^2} - 1\right)h = 0,828h;$$

- площадь сечения потока

$$\omega = (b+mh)h = (0,828h+1h)h = 1,828h^2;$$

- гидравлический радиус

$$R = 0,5h.$$

С учетом этих зависимостей находим:

- глубину потока в лотке

$$1,828h^2 = 0,125;$$

$$h = \sqrt{\frac{0,125}{1,828}} = 0,26 \text{ м};$$

- ширину лотка по дну

$$b = 0,828h = 0,828 \times 0,26 = 0,22 \text{ м};$$

- коэффициент Шези

$$C = \frac{1}{n} R^y = \frac{1}{0,011} \times (0,5 \times 0,26)^{1,5 \sqrt{0,011}} = 66;$$

Необходимый уклон лотка

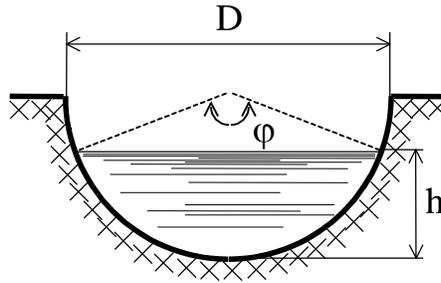
$$i_0 = \frac{V^2}{C^2 R} = \frac{4^2}{66^2 \times 0,5 \times 0,26} = 0,028.$$

## В а р и а н т ы з а д а ч и

1. Известно, что  $b = 0,3 \text{ м}$ ,  $m = 1,5$ . Определить глубину потока  $h$  и пропускную способность лотка  $Q$  при уклоне  $i_0 = 0,009$ .

2. Известно, что  $h = 0,5 \text{ м}$ ,  $m = 2$ . Определить ширину лотка по дну  $b$  и скорость потока  $V$  при уклоне  $i_0 = 0,025$ .

#### Задача 4



Для наполнения резервуара емкостью  $W$  за интервал времени  $t$  вода подается по металлическому ( $n = 0,010$ ) лотку полукруглого сечения диаметром  $D$ , установленному с уклоном  $i_0$ . Поток воды в лотке имеет глубину  $h$ .

Известно, что  $W = 500 \text{ м}^3$ ,  $D = 800 \text{ мм}$ ,  $i_0 = 0,004$ .

Определить время наполнения резервуара  $t$ , если глубина потока  $h = 300 \text{ мм}$ .

#### Решение

Из рисунка видно, что

$$\cos \frac{\varphi}{2} = \frac{0,5D - h}{0,5D} = \frac{0,5 \times 800 - 300}{0,5 \times 800} = 0,25,$$

откуда  $\varphi = 151^\circ$ .

Площадь живого сечения

$$\omega = \frac{1}{2} \frac{D^2}{4} \left( \frac{4\pi}{180^\circ} - \sin \varphi \right) = \frac{1}{2} \times \frac{0,8^2}{4} \times \left( \frac{151 \times 3,14}{180} - 0,485 \right) = 0,172 \text{ м}^2$$

Смоченный периметр

$$\chi = \frac{\pi \times 0,5D \varphi}{180^\circ} = \frac{3,14 \times 0,5 \times 0,8 \times 151}{180^\circ} = 1,05 \text{ м}$$

Гидравлический радиус

$$R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{0,172}{1,05} = 0,164 \text{ м}.$$

Коэффициент Шези

$$C = \frac{1}{n} R^{1,5\sqrt{n}} = \frac{1}{0,011} \times 0,164^{1,5\sqrt{0,011}} = 68,44.$$

Расход потока

$$Q = \omega C \sqrt{Ri} = 0,172 \times 68,44 \times \sqrt{0,164 \times 0,004} = 0,302 \text{ м}^3/\text{с}$$

Искомое время наполнения резервуара

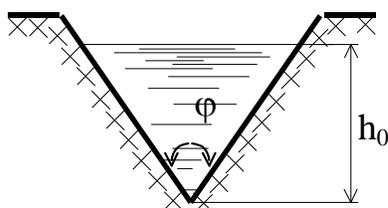
$$t = \frac{W}{Q} = \frac{500}{0,302} = 1658 \text{ } \approx 27,6 \text{ мин.}$$

## Варианты задачи

2. Известно, что  $D = 900 \text{ мм}$ ,  $i_0 = 0,003$ ,  $h = 400 \text{ мм}$ . Определить, какой объем  $W$  заполнится за время  $t$ .

3. Известно, что  $W = 500 \text{ м}^3$ ,  $D = 800 \text{ мм}$ ,  $h = 400 \text{ мм}$ . Определить, какой уклон  $i_0$  должен быть у лотка, чтобы наполнение резервуара происходило за время  $t = 10 \text{ мин}$ .

### Задача 5



Лоток треугольной формы имеет угол  $\varphi = \frac{\pi}{2}$  и продольный уклон  $i_0 = 0,001$ . Глубина потока воды в канале  $h_0 = 0,5 \text{ м}$ . Пропускная способность лотка  $Q$  и скорость потока  $V$  зависят от типа крепления откосов.

Определить, как изменится пропускная способность лотка  $Q$  при замене облицовки из строганных досок на цементную штукатурку.

Р е ш е н и е.

Площадь сечения

$$\omega = h_0^2 \times \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} = 0,5^2 \times 1 = 0,25 \text{ м}^2.$$

Смоченный периметр

$$\chi = 2h_0 \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\varphi}{2}} = 2 \times 0,5 \times \sqrt{1 + 1^2} = 1,41 \text{ м.}$$

Гидравлический радиус

$$R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{0,25}{1,41} = 0,18 \text{ м}$$

Коэффициент Шези

$$C = \frac{1}{n} R^{1,5\sqrt{n}} = \frac{1}{n} \times 0,18^{1,5\sqrt{n}}.$$

Пропускная способность лотка ([4], с.240)

$$Q = \omega C \sqrt{Ri_0} = 0,25 \times \frac{1}{n} = 0,18^{1,5} \sqrt{n} \sqrt{0,18 \times 0,001} =$$

$$= 0,00335 \times \frac{0,18^{1,5} \sqrt{n}}{n}$$

Для лотка, укрепленного строганными досками  $n = 0,011$  ([2], табл. 7.1)

$$Q_1 = 0,00335 \times \frac{0,18^{1,5} \sqrt{0,011}}{0,011} = 0,232 \text{ м}^3/\text{с}$$

Для лотка, укрепленного цементной штукатуркой  $n = 0,013$  ([2], табл. 7.1)

$$Q_2 = 0,00335 \times \frac{0,18^{1,5} \sqrt{0,013}}{0,013} = 0,192 \text{ м}^3/\text{с}$$

Пропускная способность лотка уменьшится:

$$Q_1 - Q_2 = 0,232 - 0,192 = 0,04 \text{ м}^3/\text{с}$$

### **В а р и а н т ы   з а д а ч и**

Определить, как изменится пропускная способность лотка в следующих случаях:

1. Облицовка из сухой кладки заменена на неостроганные доски.
2. Облицовка из тесаного камня заменена на хорошую бетонировку.

## Задача 6

Определить нормальную глубину в железобетонном лотке шириной  $b = 2$  м, уклон дна лотка  $i = 0,006$ , если расход воды, протекающей по лотку, равен  $Q = 10$  м<sup>3</sup>/с. Относительная погрешность по расходу не должна превышать 1 %.

### Решение

Задаются рядом значений глубин (0; 0,5; 1,0; 1,5 и 2 м), для которых в табл. 1 вычисляются соответствующие им величины площадей живого сечения, смоченного периметра, гидравлического радиуса  $R$ , коэффициента Шези  $C$ , средней скорости  $v$  и пропускной способности  $Q'$ .

При вычислении коэффициента Шези использовалась формула Маннинга. Коэффициент шероховатости стенок лотка, согласно табл. 1, принят равным 0,013. По найденным значениям строится график (рис. 1).

Таблица 1/ Определение нормальной глубины

Формула	Единица измерения	$h, \text{ м}$					
		0	0,5	1	1,5	2	1,244
$\omega = (b + mh)h$	м <sup>2</sup>	0,00	1,00	2,00	3,00	4,00	2,49
$\chi = b + 2h\sqrt{1 + m^2}$	м	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	4,49
$R = \frac{\omega}{\chi}$	м	0,00	0,33	0,50	0,60	0,67	0,55
$C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}}$	м <sup>0,5</sup> /с	0,00	64,05	68,53	70,65	71,90	69,72
$v = C\sqrt{Ri}$	м/с	0,00	2,86	3,75	4,24	4,55	4,02
$Q' = \omega v$	м <sup>3</sup> /с	0,000	2,865	7,507	12,716	18,189	10,004
$\delta = \frac{Q - Q'}{Q} 100$	□	100,00	71,35	24,93	-27,16	-81,89	-0,04

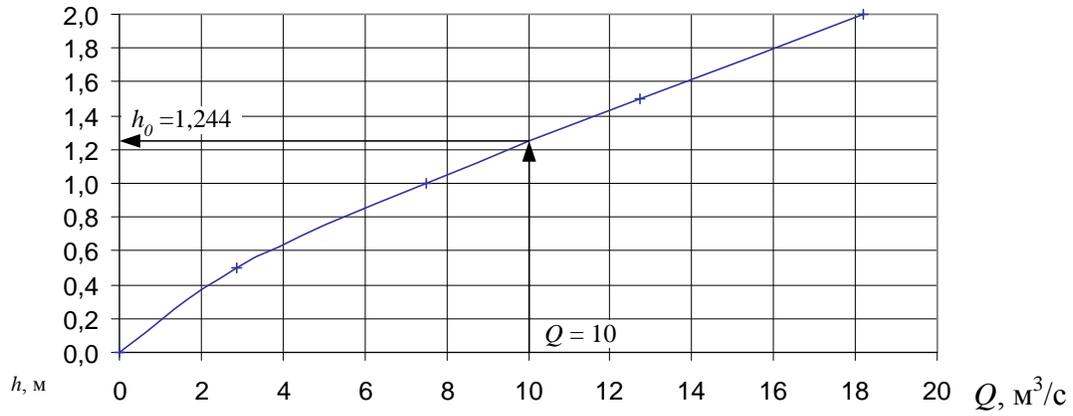


Рис. 1. Определение нормальной глубины

По заданному расходу  $10 \text{ м}^3/\text{с}$  по графику определяется глубина лотка, равная  $1,244 \text{ м}$ .  
Найденное значение подставляется в табл. 1 и вычисляется относительная погрешность.

Величина погрешности составила минус  $0,04 \%$ .  
Следовательно, нормальная глубина равна  $1,244 \text{ м}$ .

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ

### НЕРАВНОМЕРНОЕ БЕЗНАПОРНОЕ УСТАНОВИВШЕЕСЯ ДВИЖЕНИЕ ВОДЫ В КАНАЛАХ (Определение критических параметров потоков, Расчет кривой свободной поверхности)

#### Задача 1

Построить кривую свободной поверхности потока на быстротоке, имеющего трапецидальное поперечное сечение. Данные для расчета: расход воды  $Q = 88,8 \text{ м}^3/\text{с}$ ; ширина быстротока  $b = 4,0 \text{ м}$ ; коэффициент откоса  $m = 1,5$ ; уклон дна  $0,016$ ; коэффициент шероховатости стенок быстротока  $n = 0,013$ ; коэффициент Кориолиса  $\alpha = 1,1$ . На входе быстротока глубина равна критической.

Построение кривой свободной поверхности осуществляется способом Чарномского.

#### Решение

Расчет начинается с определения нормальной  $h_0$  и критической глубин  $h_k$ . Определение нормальной глубины выполнено подбором  $h_0 = 1,481 \text{ м}$  (табл. 1).

Таблица. 1 Определение нормальной глубины

Формула	Ед. изм.	Глубина $h$ , м		
		1	2	1,481
$\omega = (b + mh)h$	$\text{м}^2$	5,500	14,000	9,214
$\chi = b + 2h\sqrt{1 + m^2}$	м	7,606	11,211	9,340
$R = \frac{\omega}{\chi}$	м	0,723	1,249	0,987
$C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}}$	$\text{м}^{0,5}/\text{с}$	72,878	79,825	76,749
$v = C\sqrt{Ri}$	м/с	7,839	11,283	9,643
$Q' = \omega v$	$\text{м}^3/\text{с}$	43,116	157,966	88,847
$\delta = \frac{Q - Q'}{Q} 100$	□	51,446	-77,89	-0,0526

Аналогично определяется критическая глубина  $h_k = 2,73 \text{ м}$  (табл. 2). Предварительно вычисляется

$$A = \frac{\alpha Q^2}{g} = \frac{1,1 \cdot 88,8^2}{9,8} = 885,1$$

Таблица.2 Определение критической глубины

Формула	Ед. изм.	h, м		
		2	3	2,73
$\omega = (b + mh)h$	м <sup>2</sup>	14,000	25,500	22,099
$B = b + 2mh$	м	10,000	13,000	12,190
$D = \frac{\omega^3}{B}$	м <sup>5</sup>	274,400	1275,490	885,390
$\delta = \frac{A - D}{A} 100$ □	□	68,998	-44,1069	-0,0328

Далее находят критический уклон, предварительно определив смоченный периметр, гидравлический радиус и коэффициент Шези, соответствующие критической глубине

$$\chi_k = 4 + 2 \cdot 2,73 \cdot \sqrt{1 + 1,5^2} = 13,843 \text{ м};$$

$$R_k = \frac{22,099}{13,843} = 1,596 \text{ м};$$

$$C = \frac{1}{0,013} 1,596^{\frac{1}{6}} = 83,16 \text{ м}^{0,5}/\text{с};$$

$$i_k = \frac{Q^2}{\omega_k^2 C_k^2 R_k} = \frac{88,8^2}{22,099^2 \cdot 83,16^2 \cdot 1,596} = 0,0015$$

Находятся глубины в начале и конце сооружения:

$$h_1 = h_k = 2,73 \text{ м}; \quad h_7 = 1,01 h_0 = 1,496 \text{ м}.$$

(Для варианта перепада данные глубины следует определять по формулам:

$$h_1 = 0,99 h_0; \quad h_7 = h_k).$$

Вычисляется шаг глубин

$$\Delta h = \frac{h_1 - h_7}{6} = \frac{2,73 - 1,496}{6} = 0,026$$

Дальнейшие расчеты выполняются в табличной форме (табл. 3).

Глубины определяются по формуле

$$h_{j+1} = h_j - \Delta h_{\text{м}}$$

В табл. 4.4 определяются средние уклоны и длины.

Таблица 3 Определение удельных энергий сечения и уклонов трения

$j$	$h_j$ , м	$\omega_j = (b + mh_j) \lambda$ , м <sup>2</sup>	$h_j = b + 2h_j$ , м	$\sqrt{R_j \bar{m}^2}$ , м	$\frac{\omega_j}{C_j} = \frac{1}{n} R_j^{\frac{1}{6}}$ , м <sup>0,5/с</sup>	$\frac{Q^2}{\omega_j^2 C_j^2 R_j} = h_j + \frac{\alpha Q^2}{2g\omega_j^2}$	$\mathcal{E}_j$ , м
1	2,7 30	22,099	13,843	1,596	83,160	0,0015	3,553
2	2,5 24	19,655	13,101	1,500	82,303	0,0020	3,565
3	2,3 19	17,338	12,360	1,403	81,387	0,0028	3,656
4	2,1 13	15,148	11,618	1,304	80,401	0,0041	3,864
5	1,9 07	13,085	10,877	1,203	79,330	0,0061	4,255
6	1,7 02	11,149	10,135	1,100	78,155	0,0094	4,935
7	1,4 96	9,339	9,393	0,994	76,849	0,0154	6,104

Таблица .4

Определение длин участков

$k$	$\bar{i}_k = \frac{i_k + i_{k+1}}{2}$	$l_k = \frac{\mathcal{E}_{k+1} - \mathcal{E}_k}{i - \bar{i}_k}$ , м
1	0,0017	2,343
2	0,0024	8,878
3	0,0035	19,944
4	0,0051	41,188
5	0,0078	93,362

6	0,0124	364,659
---	--------	---------

По данным табл. 3 и 4 строится кривая свободной поверхности (рис. 1).

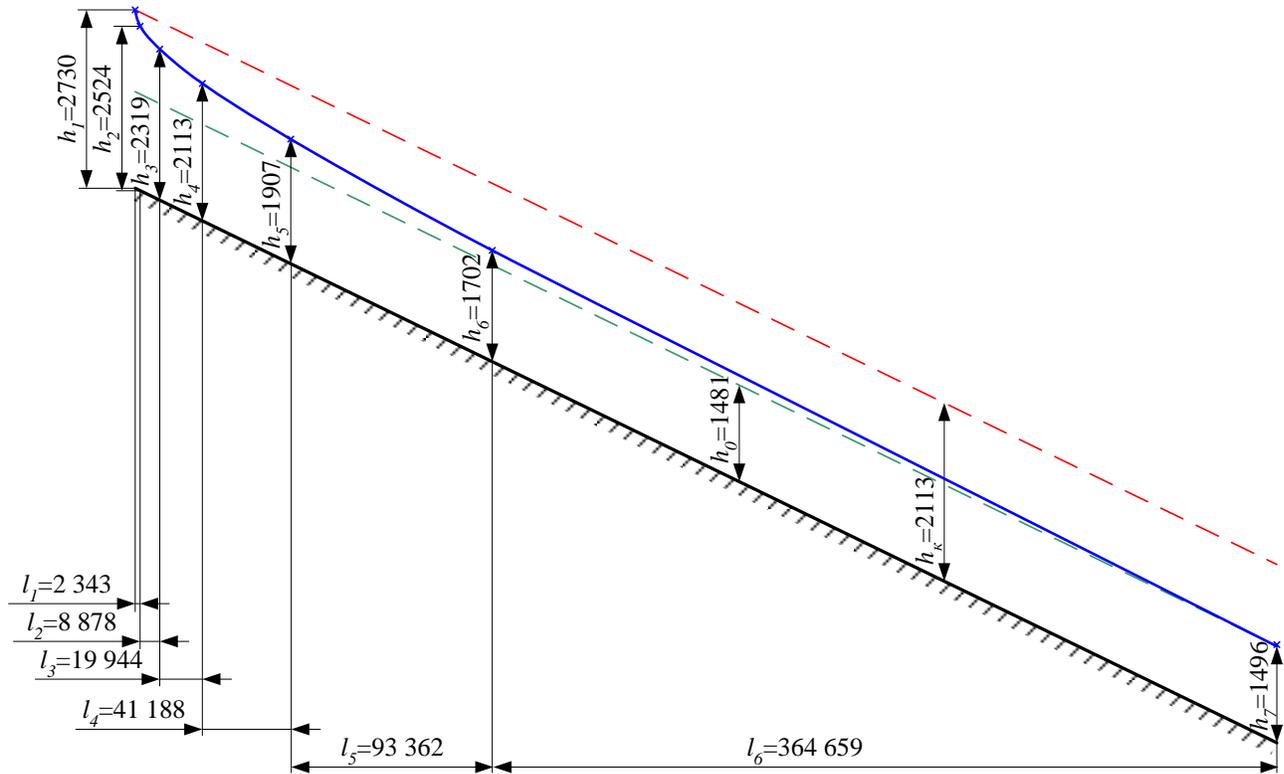


Рис. 1. кривая свободной поверхности

# ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ

(Расчет гидравлического прыжка Расчет сопряжения бьефов)

## Расчет водобойного колодца

### Задача 1

В прямоугольном канале шириной  $b = 22$  м устроен перепад (см. рис. 1). Установить характер сопряжения ниспадающей с перепада струи с нижним бьефом и определить размеры водобойного колодца. Расход воды в канале  $Q = 44$  м<sup>3</sup>/с, высота перепада  $p = 2,9$  м, бытовая глубина  $h_0 = 1,4$  м, коэффициент скорости  $\varphi = 0,95$ , глубину воды на уступе перепада принять равной критической.

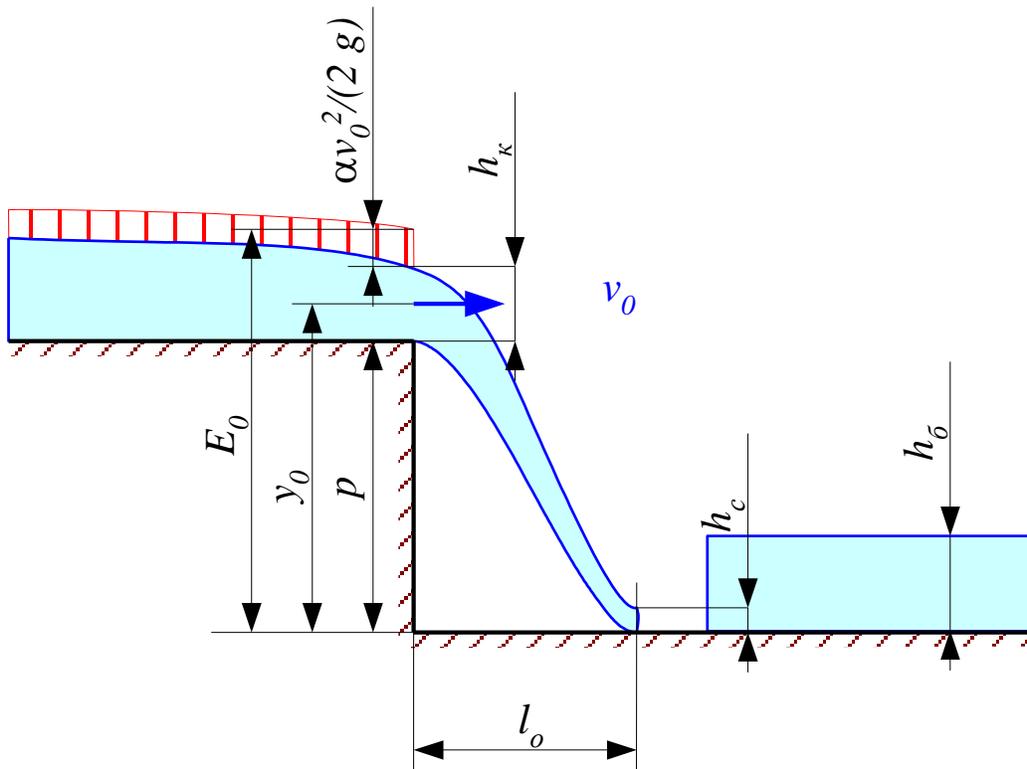


Рис. 1. Сопряжение бьефов. Перепад

Решение

1. Определяется удельный расход

$$q = \frac{Q}{b} = \frac{44}{22} = 2 \text{ м}^2/\text{с}.$$

2. Находится критическая глубина

$$h_k = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} = \sqrt[3]{\frac{2^2}{9,81}} = 0,742 \text{ м}.$$

3. Вычисляется скорость движения воды на уступе перепада

$$v_0 = \frac{q}{h_k} = \frac{2}{0,742} = 2,697 \text{ м/с}.$$

4. Находится полный напор

$$E_0 = p + h_k + \frac{v_0^2}{2g} = 2,9 + 0,742 + \frac{2,697^2}{2 \cdot 9,81} = 4,012 \text{ м}.$$

5. Сжатая глубина определяется:

$$A = \frac{q^2}{2g\varphi^2} = \frac{2^2}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,95^2} = 0,226 \text{ м}^3;$$

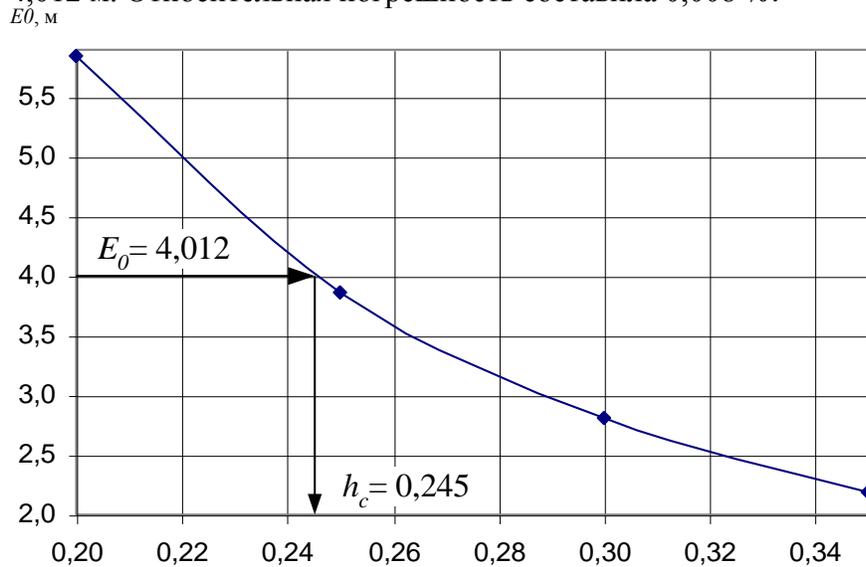
$$E_0 = h_c + \frac{0,226}{h_c^2}.$$

Задавшись рядом сжатых глубин (0,2; 0,25; 0,35 и 0,5 м) вычисляются соответствующие им величины полного напора (табл. 5.1)

По данным табл. 5.1 строится график зависимости полного напора от величины сжатой глубины (рис. 5.8). Откладывая по вертикальной оси величину полного напора 4,012 м,

определяем значение сжатой глубины  $h_c = 0,245$  м.

Вычисленное значение полного напора для этой глубины равно 4,012 м. Относительная погрешность составила 0,008 %.



$h_c, \text{ м}$

**Таблица 5.1**  
**К определению**  
**сжатой глубины**

$h_c, \text{ м}$	$E_0, \text{ м}$
0,20	5,853
0,25	3,868
0,30	2,813
0,35	2,196

Рис. 2. Определение сжатой глубины

По формуле гидравлического прыжка определяется вторая сопряженная глубина

$$h_2 = \frac{0,245}{2} \left[ \sqrt{1 + 8 \left( \frac{0,742}{0,245} \right)^3} - 1 \right] = 1,706 \text{ м.}$$

Так как  $h_2 > h_{\bar{0}}$ , то сопряжение струи с нижним бьефом будет осуществляться с помощью отогнанного гидравлического прыжка.

Определение глубины колодца сведено в табл. 5.2.

Таблица 5.2

### Определение глубины колодца

$d_0, \text{ м}$	$E_0' = E_0 + d_0, \text{ м}$	$h_c, \text{ м}$	$h_2, \text{ м}$	$d_0 + h_0, \text{ м}$
0,000	4,012	0,245	1,706	1,400
0,250	4,262	0,237	1,740	1,650
0,500	4,512	0,230	1,773	1,900
0,355	4,368	0,234	1,754	1,755

По данным табл. 5.2 строятся графики  $h_2 = f_1(d_0)$  и  $d_0 + h_0 = f_2(d_0)$  (рис. 3).

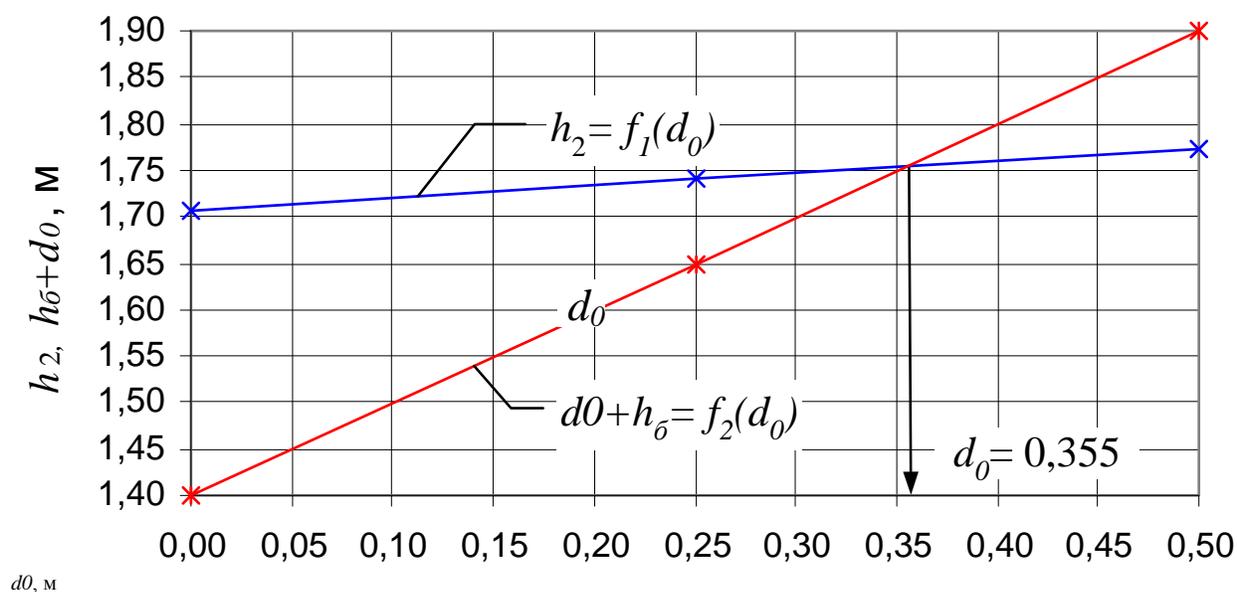


Рис. 3 Определение глубины колодца

Точка пересечения этих линий является теоретической глубиной колодца  $d_0 = 0,355$  м. Относительная погрешность определения теоретической глубины составила 0,07 %. Чтобы в нижнем бьефе получился затопленный прыжок, теоретическую глубину колодца необходимо увеличить на 5 %:

$$d = 1,05 d_0 = 0,373 \text{ м.}$$

Перепад на выходе из колодца в отводящее русло

$$\Delta z = \frac{q^2}{2 g \varphi_1^2 h_0^2} = \frac{2^2}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,85^2 \cdot 1,4^2} = 0,144 \text{ м.}$$

Длина гидравлического прыжка

$$l_n = 2,5(1,9h_2 - h_c) = 2,5(1,9 \cdot 1,754 - 0,234) = 7,747 \text{ м.}$$

Высота центра тяжести струи над дном колодца

$$y_0 = d + p + \frac{h_k}{2} = 0,373 + 2,9 + 0,742 = 3,644 \text{ м.}$$

Дальность отлета струи находится по формуле (5.9)

$$l_{отл} = 2,697 \sqrt{\frac{2 \cdot 3,644}{9,81}} = 2,325 \text{ м.}$$

Длина водобойного колодца определяется по формуле (5.8)

$$l = 2,325 + 0,8 \cdot 7,747 = 8,522 \text{ м.}$$

Основные размеры водобойного колодца представлены на рис. 5.10.

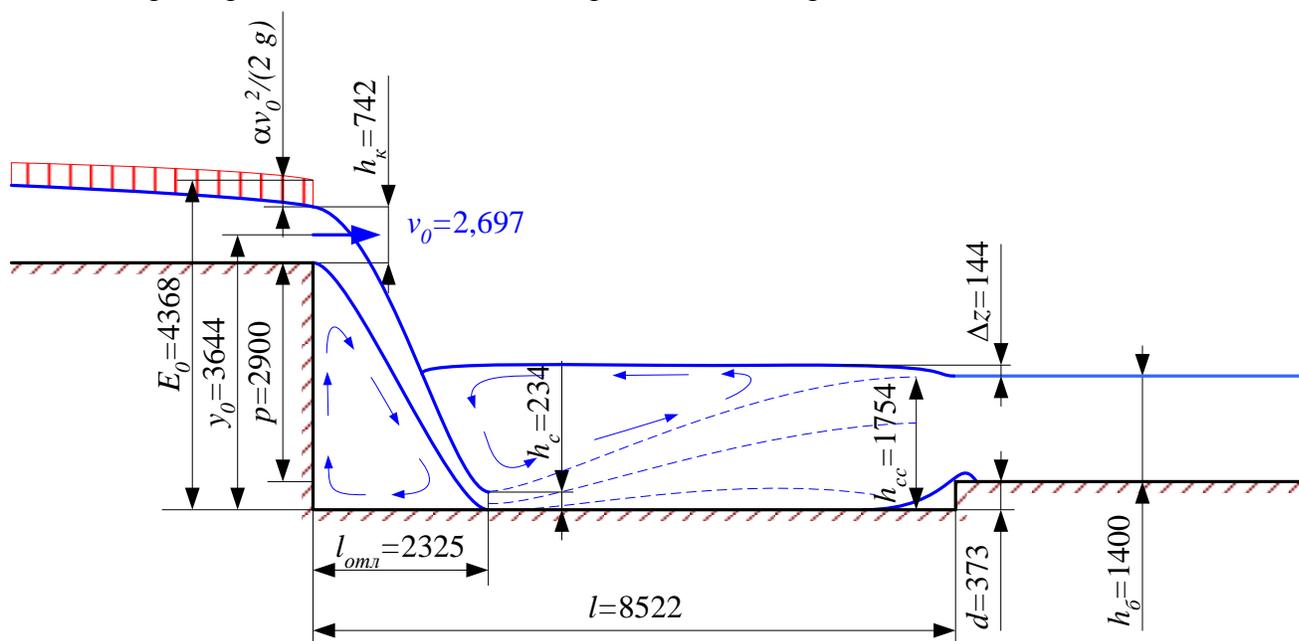


Рис. 4. Схема водобойного колодца

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ

### Расчет водобойного водобойной стенки.

#### Задача 1

В прямоугольном канале шириной  $b = 22$  м устроен перепад (см. рис. 1). Установить характер сопряжения ниспадающей с перепада струи с нижним бьефом и определить размеры водобойного колодца. Расход воды в канале  $Q = 44$  м<sup>3</sup>/с, высота перепада  $p = 2,9$  м, бытовая глубина  $h_б = 1,4$  м, коэффициент скорости  $\varphi = 0,95$ , глубину воды на уступе перепада принять равной критической.

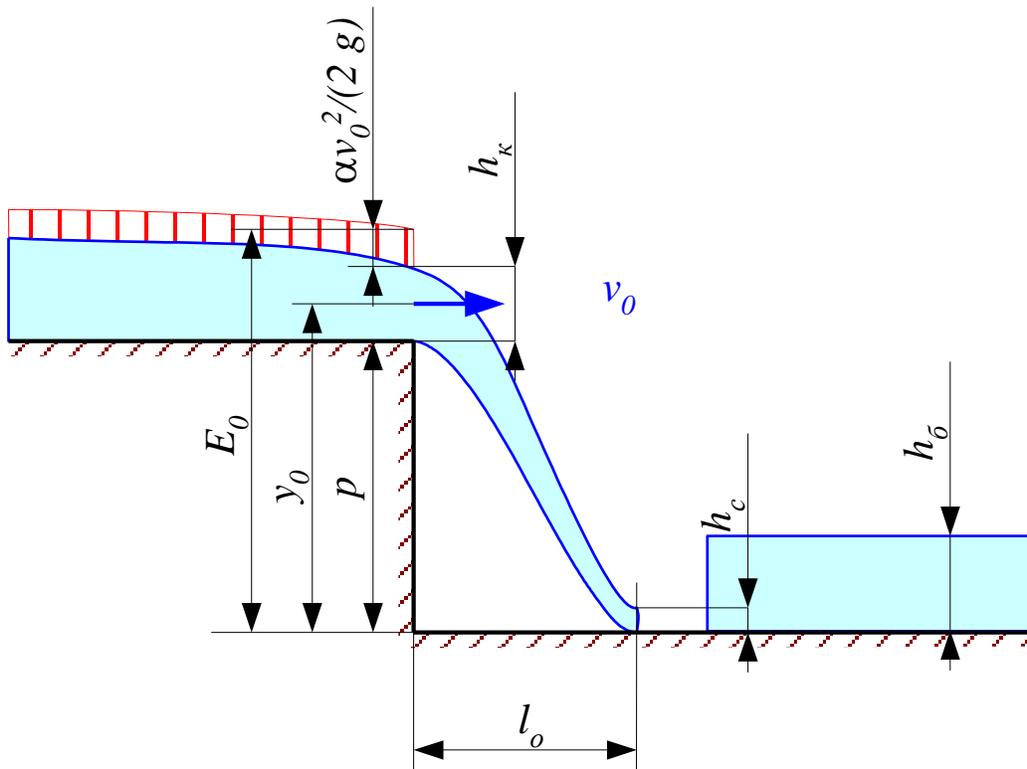


Рис. 1. Сопряжение бьефов. Перепад

#### Решение

Выполняется расчет сжатой, критической и сопряженной сжатой глубины аналогично предыдущему примеру.

Дается заключение о виде сопряжения бьефов.

Затем определяется скорость подхода к водобойной стенке

$$v = \frac{q}{h_{cc}} = \frac{2}{1,706} = 1,172 \text{ м/с.}$$

По формуле (5.14) вычисляется скоростной напор

$$h_v = \frac{(1,172)^2}{2 \cdot 9,81} = 0,070 \text{ м.}$$

Находится полный напор на водосливной стенке

$$H_0 = \left( \frac{2}{0,42 \sqrt{2 \cdot 9,81}} \right)^{\frac{2}{3}} = 1,049 \text{ м.}$$

Геометрический напор на водосливной стенке определяется по (5.13)

$$H = 1,049 - 0,070 = 0,979 \text{ м.}$$

Определяется высота водобойной стенки при условии, что водослив не подтоплен

$$c = 1,05 h_2 - H = 1,05 \cdot 1,706 - 0,979 = 0,812 \text{ м.}$$

Так как  $c < h_b$ , водослив является подтопленным.

Дальнейший расчет проводится в табл. 1. Задаются рядом высот водобойной стенки (0,6; 0,7; 0,8 м). Для этих высот вычисляются: геометрический  $H$  и полный  $H_0$  напоры на водосливе; высоту подтопления водослива  $h_n$  и отношение высоты подтопления водослива к геометрическому напору на водосливе.

Интерполяцией данных табл. 2 определяется коэффициент подтопления  $\sigma_n$ .

Таблица 2

**Коэффициент подтопления водослива**

$h_n/H$	0,050	0,100	0,200	0,300	0,400	0,500	0,600	0,700
$\sigma_n$	0,997	0,995	0,985	0,972	0,957	0,935	0,906	0,856

Продолжение табл. 2

$h_n/H$	0,800	0,850	0,900	0,925	0,950	0,975	0,990	0,995	1,000
$\sigma_n$	0,776	0,710	0,621	0,555	0,470	0,319	0,170	0,100	0,000

Находится удельный расход водобойной стенки. По данным табл. 1 строится график зависимости удельного расхода от высоты стенки (рис. 2). Отложив значение удельного

расхода, находят высоту стенки – 0,713 м. Погрешность вычисления составила минус 0,06 %.

Таблица 1

**Определение высоты водобойной стенки**

$c, \text{ м}$	$H = 1,05 h_2 - c$ , м	$H_0 = H + h_v$ , м	$h_n = h_0 - c$ , м	$\frac{h_n}{H}$	$\sigma_n$	$q_{cm} = \sigma_n m \sqrt{2 g H_0^{3/2}}$ , м <sup>2</sup> /с
0,6	1,191	1,261	0,800	0,672	0,870	2,292
0,7	1,091	1,161	0,700	0,641	0,885	2,060
0,8	0,991	1,061	0,600	0,605	0,903	1,837
0,727	1,064	1,134	0,673	0,632	0,890	1,999

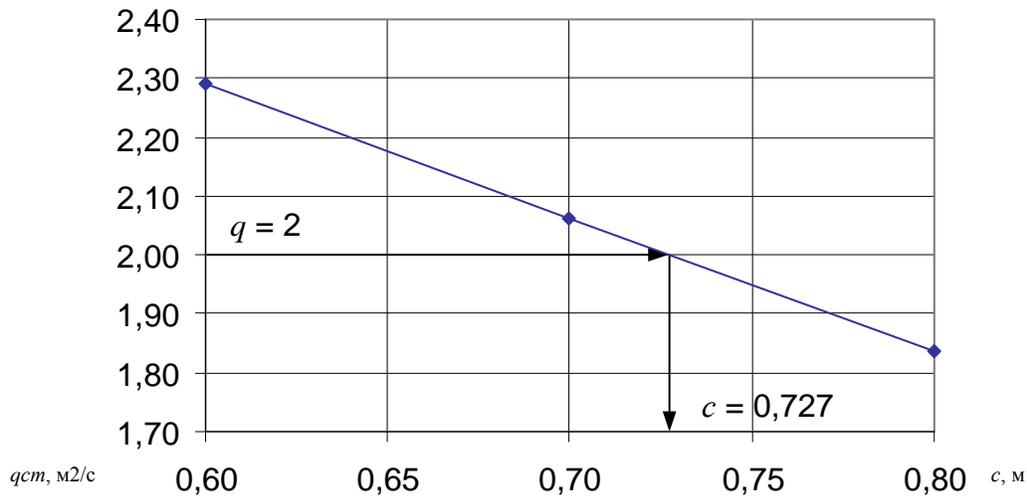


Рис. 2. Определение высоты водобойной степени

Длина гидравлического прыжка

$$l_n = 2,5(1,9 h_2 - h_c) = 2,5(1,9 \cdot 1,706 - 0,245) = 7,491 \text{ м.}$$

Высота центра тяжести струи

$$y_0 = p + \frac{h_k}{2} = 2,9 + 0,742 = 3,271 \text{ м.}$$

Дальность отлета струи

$$l_{omл} = v_0 \sqrt{\frac{2 \cdot y_0}{g}} = 2,697 \sqrt{\frac{2 \cdot 3,271}{9,81}} = 2,202 \text{ м.}$$

Длина водобойного колодца

$$l = l_{omл} + 0,8l_n = 2,202 + 0,8 \cdot 7,491 = 8,195 \text{ м.}$$

Основные размеры водобойного колодца представлены на рис. 3

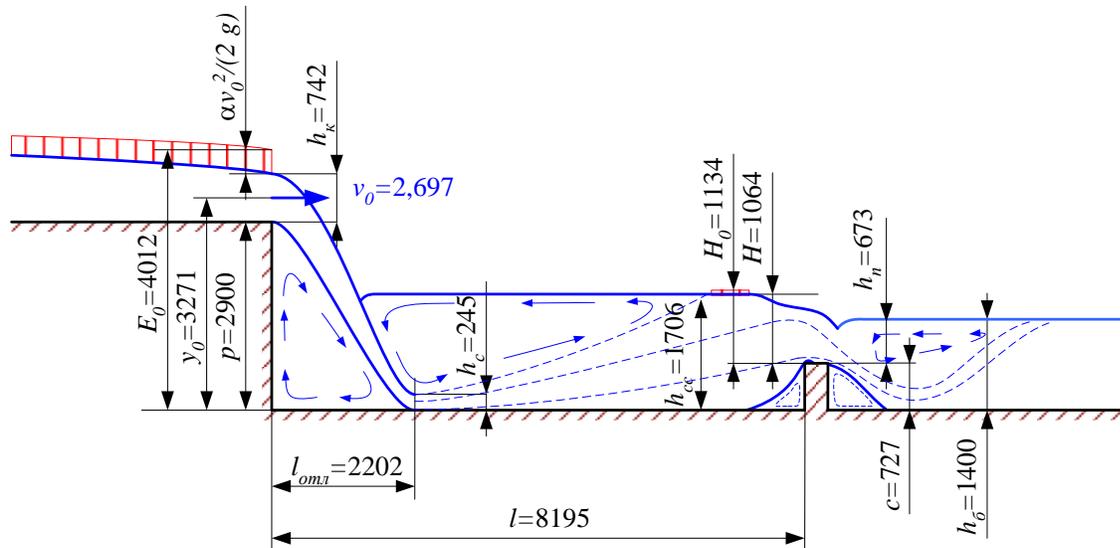


Рис. 3. Схема водобойной стенки

### **Библиографический список используемой литературы**

1. Тужилкин А.М, Злобин Е.К, Бурдова М.Г., Белоусов Р.О. Гидравлика: учебное пособие. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017, 266 с. – 200 экз.
2. Земцов, В.М. Гидравлика : учеб. пособие для вузов / В.М.Земцов; под ред. Ю.В.Брянской .— М. : АСВ, 2007 .— 352с. : ил. — Библиогр. в конце кн. — ISBN 978-5-93093-510-3 : 181.82. 15 экз.
3. Курганов А.М. , Федоров Н.Ф. Гидравлические расчеты систем водоснабжения и водоотведения: Справочник / Под общ. ред. А.М.Курганова. - 3-е изд., перераб. и доп. - Л.: Стройиздат, 1986. - 440 с.
4. Тужилкин А.М., Бурдова М.Г., Механика жидкости и газа: Учебное пособие. ТулГУ. Тула 1998. – 283 с.