

Федеральное агентство по образованию

.....

Государственное образовательное учреждение  
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

-----

*К.В.Зотов      М.Ю.Патрина*

**Расчёты водопропускных сооружений на каналах  
гидромелиоративных систем**

Методические указания

Санкт-Петербург  
2010

Расчёты водопропускных сооружений на каналах гидромелиоративных систем:  
Метод. указ./Сост.: К.В.Зотов, М.Ю.Патрина.

Пособие соответствует государственному образовательному стандарту дисциплины «Сооружения гидромелиоративных систем» специальности 280401 «Мелиорация, рекультивация и охрана земель».

Приведены общие положения и необходимые сведения для гидравлических расчётов водовыпусков различных типов, а также необходимые справочные материалы.

Методические указания предназначены для студентов инженерно-строительного факультета при изучении курса «Сооружения гидромелиоративных систем» в качестве руководства для курсового и дипломного проектирования внутрисистемных гидротехнических сооружений.

## Содержание

|                                                    | Стр. |
|----------------------------------------------------|------|
| 1. Гидравлический расчет открытых сооружений ..... | 4    |
| 2.Трубчатые сооружения .....                       | 12   |
| 3. Расчёт быстотоков .....                         | 14   |
| 4.Расчёт перепадов .....                           | 16   |
| 5. Сопряжение бьефов .....                         | 19   |
| 6. Расчёт водобойного колодца .....                | 22   |
| 7. Водобойный колодец, расширяющийся в плане ..... | 24   |
| Список литературы .....                            | 30   |

## 1. Гидравлический расчет открытых сооружений

Размеры водопропускных отверстий определяют на пропуск максимальных расчетных расходов, при полностью открытых отверстиях.

Открытые сооружения в гидравлическом отношении представляют собой водосливы с широким порогом, подтопленные или неподтопленные (рис.1).

Водослив считается подтопленным, если  $h_n \geq n \cdot H_0$ , где  $n$  - коэффициент или критерий подтопления, изменяющейся от 0,75 до 0,87 в зависимости от коэффициента расхода  $m$  и коэффициента потока при выходе потока в нижний бьеф

$$V_n = \frac{B \cdot h_n}{\Omega_{H.B.}} \quad (1)$$

где  $B$  - ширина водослива,  $h_n$  и  $\Omega_{H.B.}$  - соответственно, глубина подтопления и площадь живого сечения в нижнем бьефе. В первом приближении можно принимать  $n = 0,8$ . Более точно критерий подтопления определяется по графику, составленному по формуле Р.Р. Чугаева (Рис.2).

Неподтопленный водослив.

Глубина на пороге принимается обычно равной критической глубине:

$$h = h_{кр} - \frac{2 \cdot \varphi^2}{1 + 2 \cdot \varphi^2}; H_0 = \sqrt[3]{2 \cdot m^2 \cdot H_0} \approx 0.6 \cdot H_0 \quad (2)$$

где  $\varphi$  - коэффициент скорости;

$m$  - коэффициент расхода.

Ширина водосливного фронта " $b$ " определяется по формуле:

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

где  $Q$  - расчётный расход,  $m$  - коэффициент расхода,  $H_0$  - напор на пороге водослива с учётом скорости подхода.

Числовые значения коэффициентов  $\varphi$  и  $m$  (по Н.Н. Павловскому) приведены в таблице 1. При ориентированных расчетах можно принимать  $\varphi = 0,92$ ;  $m = 0,35$ .

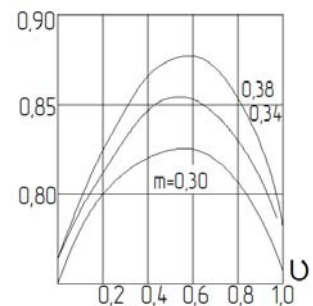


Рис. 2. Графики для определения коэффициента

Таблица 1

| Условия истечения                                | $\varphi$ | $m$   |
|--------------------------------------------------|-----------|-------|
| При отсутствии гидравлических сопротивлений      | 1         | 0,385 |
| При хорошо подобранной форме входа               | 0,95      | 0,65  |
| Порог с закругленным входным ребром              | 0,92      | 0,350 |
| При притупленном входном ребре                   | 0,88      | 0,335 |
| При незакругленном входном ребре (острая кромка) | 0,85      | 0,320 |
| При неблагоприятных гидравлических условиях      | 0,80      | 0,300 |

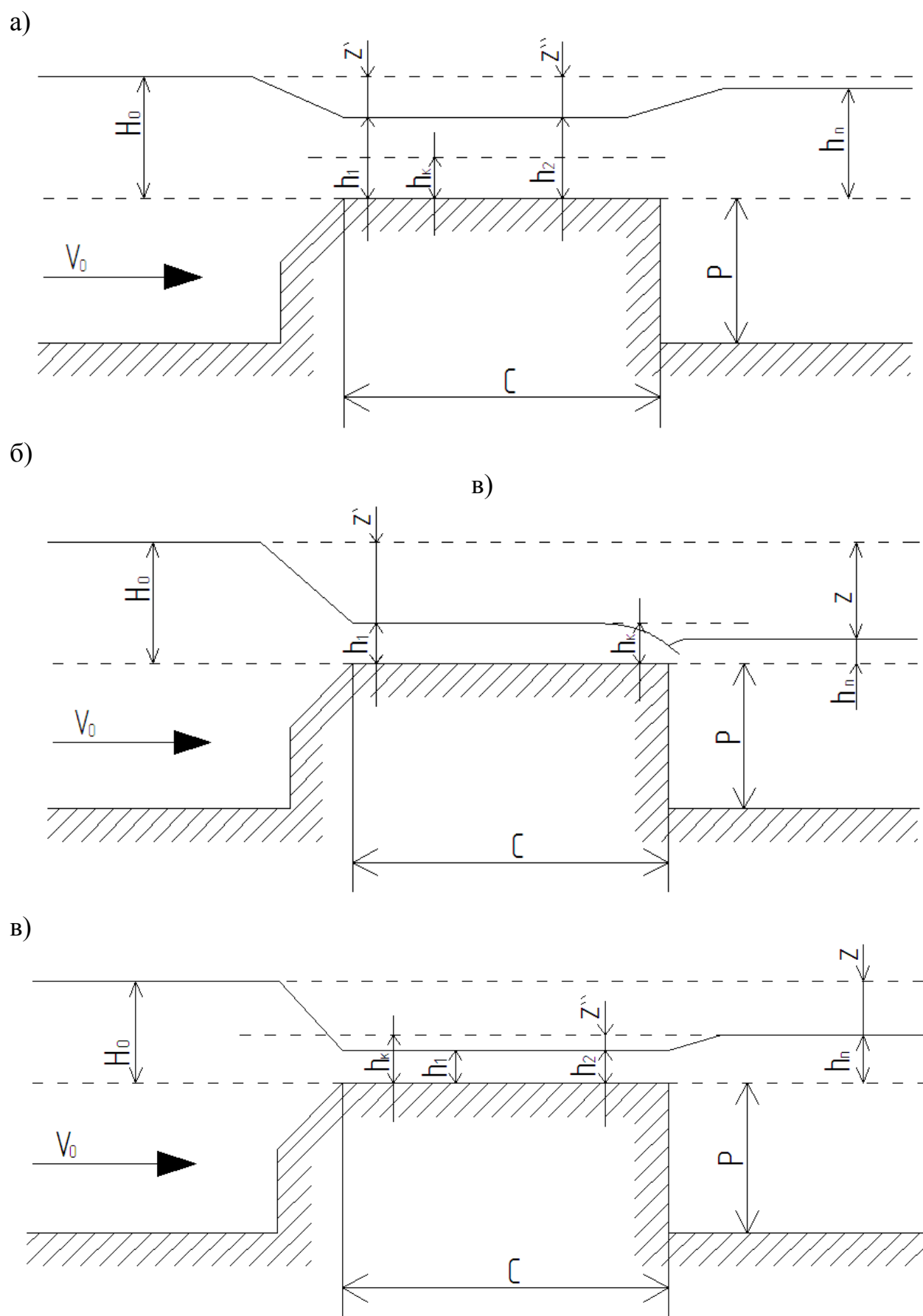


Рис. 1. Расчётные схемы подтопленного (а) и неподтопленного (б) и (в) водостоков.

### Подтопленный водослив

Глубина на пороге в этом случае принимается равной глубине подтопления, то есть ширина водосливного фронта определяется по формуле:

$$b = \frac{Q}{\varphi h_n \sqrt{2g(H_0 - h_n)}}, \quad (4)$$

где все обозначения указаны выше, или по зависимости

$$b = \frac{Q}{\varphi \sigma_n \sqrt{2g} H_0^{3/2}}, \quad (5)$$

где  $\sigma_n$  – коэффициент подтопления, зависящий от отношения  $\frac{h_n}{H_0}$

Числовые значения приведены в таблице 2.

Таблица 2

| $h_n/H_0$  | до 0,7 | 0,8   | 0,85  | 0,90  | 0,95  | 0,98  | 0,999 |
|------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\sigma_n$ | 1,0    | 0,928 | 0,855 | 0,739 | 0,552 | 0,360 | 0,082 |

Если скорость на пороге подтопления водослива равна  $V$ , то перепад  $Z$  (подпор перед сооружением) будет равен:

$$Z = \frac{1}{\varphi^2} \cdot \frac{V^2}{2g} = \frac{V_0^2}{2g} \quad (6)$$

где  $V_0$  – скорость подхода (в верхнем бьефе),  $V$  – скорость на пороге водослива.

При большей площади поперечного сечения потока перед водосливом, пренебрегая скоростью подхода ( $V_0 \approx 0$ ), получим

$$Z = \frac{1}{\varphi} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (7)$$

На первом этапе расчетов величины глубины потока в конце входного участка, коэффициенты расхода и скорости принимаются ориентировочными, так как они зависят от геометрии входных и выходных элементов конструкций сооружений, которые будут приняты при конструировании.

В более точных расчетах при установленных формах конструирования сооружений глубина на пороге подтопленного водослива определяется по зависимости

$$h = h_n - Z'' = h_n - \xi_{bc} \cdot h_k \quad (8)$$

где  $h_n$  – глубина подтопления,  $h_k$  – критическая глубина,  $\xi_{bc}$  – относительный перепад восстановления, определяемый по графику, приведенному на рис.2.

Глубина воды на пороге неподтопленного водослива определяется по формуле

$$Q = \varphi h_1 b \sqrt{2g(H_0 - h_1)} \quad (9)$$

при известных  $Q, b$  и  $H_0$ , то есть путем решения кубического уравнения

$$h_1^3 - H_0 \cdot h_1 + \left(\frac{m}{\varphi}\right)^2 \cdot H_0^3 = 0 \quad (10)$$

При этом коэффициент  $\varphi$  принимается в зависимости от коэффициента расхода  $m$  согласно таблице 3 (по Д.И. Кумину).

Таблица 3

|           |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $m$       | 0,30  | 0,31  | 0,32  | 0,33  | 0,34  | 0,35  | 0,36  | 0,37  | 0,38  |
| $\varphi$ | 0,943 | 0,950 | 0,956 | 0,963 | 0,970 | 0,976 | 0,983 | 0,990 | 0,996 |

Для быстрого определения  $h_1$  можно пользоваться формулой

$$h_1 = kH_0, \quad (11)$$

где значение коэффициента  $k$  находится по графику (рис. 3).

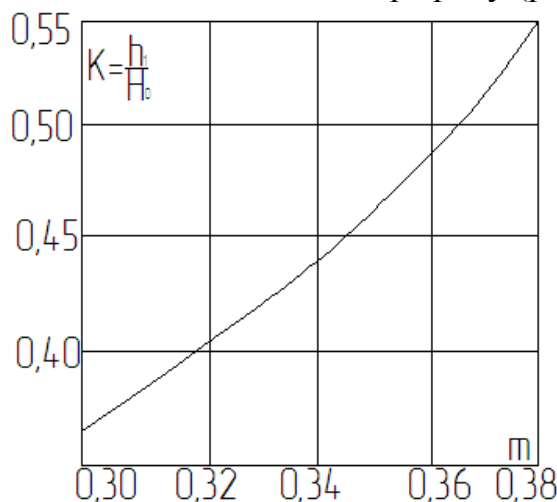


Рис. 3 График  $m=f(k)$

Коэффициент расхода в первом приближении следует принимать  $m = 0,36$ , если входные ребра водослива округлены или притуплены, а также если верховые грани устоев и водосливной стенки имеют наклон в сторону верхнего бьефа. Во всех случаях принимают  $m = 0,32$ .

При уточненном расчете в техническом проекте коэффициент расхода определяется по способу Д.И. Кумина следующим образом:

а) если водослив без бокового сжатия, то есть  $B = b$ , или без порога, то есть высота водосливной стенки  $P_b = 0$ , то коэффициент расхода принимается, соответственно, по таблице 4 и 5;

б) если водослив имеет боковое сжатие,  $b < B$  и высоту порога  $P_b > 0$ , – по одной из следующих формул:

$$m = m_\eta + (m_\beta - m_\eta)\bar{H}_\eta + (0,385 - m_\eta)\bar{H}_\eta\bar{H}_\beta \quad (12)$$

или

$$m = m_\beta + (m_\eta - m_\beta)\bar{H}_\beta + (0,385 - m_\beta)\bar{H}_\eta\bar{H}_\beta \quad (13)$$

(числовое значение коэффициента  $m_\eta$  берется из последней строчки таблицы 4 (при  $n = \infty$ ) соответственно профилю водосливной стенки, а значение коэффициента  $m_\beta$  – из первой строки таблицы 5 соответственно условиям бокового сжатия). Вычисление производится по формуле (12) если окажется, что  $m_\beta > m_\eta$ , или по формуле (13), если  $m_\beta < m_\eta$ .

Значения  $\bar{H}_\eta$  и  $\bar{H}_\beta$ . Вычисляются по формулам:

$$\bar{H}_\eta = \frac{H}{H + 2P_b}, \quad (14)$$

$$\bar{H}_\beta = \frac{b}{3,5B - 2,5B}, \quad (15)$$

При расчёте отверстий, образованных забральными балками, а так же для схемы из-под затвора “под уровень” (рис.4) принимается формула:

$$Q = \omega \mu \sqrt{2gz_0}, \quad (16)$$

где  $\mu$  – коэффициент расхода,  $\omega$  – площадь отверстия.

$z_0$  – перепад с учётом скоростного напора скорости подхода  $V_0$ :

$$z_0 = z + \frac{V_0^2}{2g} \quad (17)$$



Таблица 4

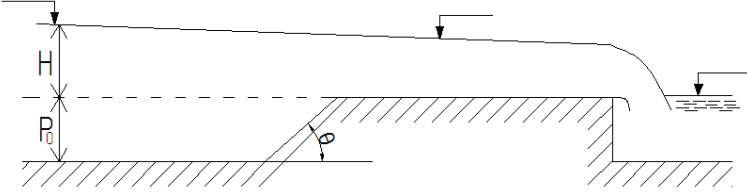
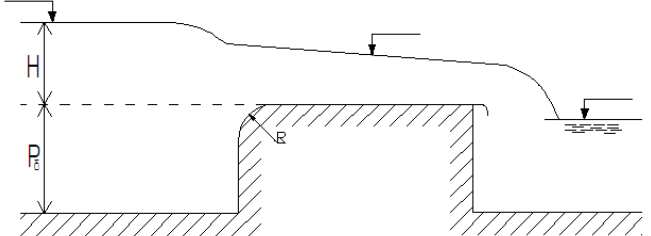
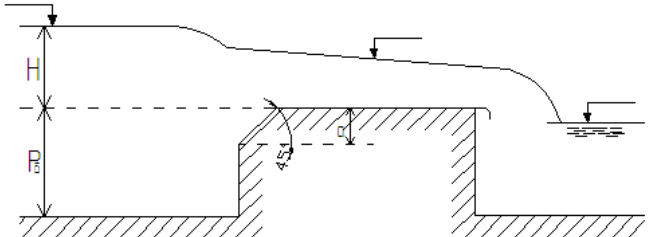
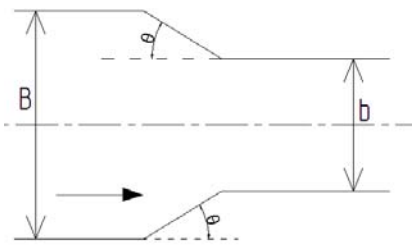
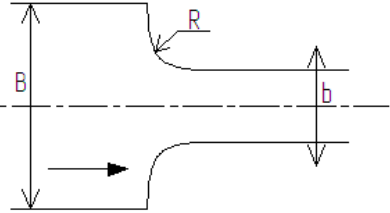
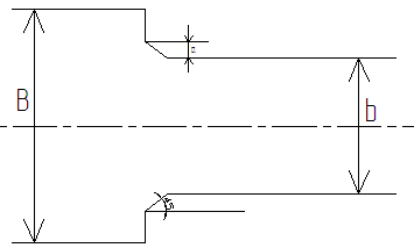
|                        |                                                                                      |       |       |       |       |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| $\eta = \frac{P_b}{H}$ |    |       |       |       |       |
|                        | $\text{ctg } \theta$                                                                 |       |       |       |       |
|                        | 0                                                                                    | 1     | 2     | 2,5   |       |
| 0,2                    | 0,366                                                                                | 0,377 | 0,382 | 0,382 |       |
| 0,6                    | 0,350                                                                                | 0,370 | 0,79  | 0,380 |       |
| 1,0                    | 0,342                                                                                | 0,367 | 0,377 | 0,378 |       |
| 2,0                    | 0,333                                                                                | 0,363 | 0,475 | 0,377 |       |
| 6,0                    | 0,325                                                                                | 0,362 | 0,374 | 0,376 |       |
| $\infty$               | 0,320                                                                                | 0,358 | 0,373 | 0,375 |       |
| $\eta = \frac{P_b}{H}$ |   |       |       |       |       |
|                        | $r/H$                                                                                |       |       |       |       |
|                        | 0,025                                                                                | 0,10  | 0,4   | 0,8   | 1,0   |
| 0,2                    | 0,372                                                                                | 0,375 | —     | —     | —     |
| 0,6                    | 0,631                                                                                | 0,367 | 0,374 | —     | —     |
| 1,0                    | 0,355                                                                                | 0,362 | 0,371 | 0,376 | —     |
| 2,0                    | 0,349                                                                                | 0,358 | 0,368 | 0,375 | 0,382 |
| 6,0                    | 0,344                                                                                | 0,354 | 0,366 | 0,373 | 0,380 |
| $\infty$               | 0,340                                                                                | 0,351 | 0,364 | 0,372 | 0,375 |
| $\eta = \frac{P_b}{H}$ |  |       |       |       |       |
|                        | $a/H$                                                                                |       |       |       |       |
|                        | 0,025                                                                                | 0,1   | 2     |       |       |
| 0,2                    | 0,371                                                                                | 0,376 | —     |       |       |
| 0,6                    | 0,359                                                                                | 0,376 | —     |       |       |
| 1,0                    | 0,353                                                                                | 0,363 | —     |       |       |
| 2,0                    | 0,347                                                                                | 0,358 | —     |       |       |
| 6,0                    | 0,341                                                                                | 0,354 | 0,360 |       |       |
| $\infty$               | 0,337                                                                                | 0,362 | 0,358 |       |       |

Таблица 5

|                      |                                                                                      |       |       |       |
|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|
| $\eta = \frac{b}{B}$ |    |       |       |       |
|                      | $\text{ctg } \theta$                                                                 |       |       |       |
|                      | 0                                                                                    | 1     | 2     | 3     |
| 0,0                  | 0,320                                                                                | 0,350 | 0,353 | 0,350 |
| 0,2                  | 0,324                                                                                | 0,352 | 0,355 | 0,352 |
| 0,4                  | 0,330                                                                                | 0,356 | 0,358 | 0,356 |
| 0,6                  | 0,340                                                                                | 0,361 | 0,363 | 0,361 |
| 0,8                  | 0,353                                                                                | 0,369 | 0,370 | 0,39  |
| 1,0                  | 0,385                                                                                | 0,385 | 0,385 | 0,385 |
| $\eta = \frac{b}{B}$ |   |       |       |       |
|                      | $r/B$                                                                                |       |       |       |
|                      | 0                                                                                    | 0,1   | 0,3   | 0,5   |
| 0,0                  | 0,320                                                                                | 0,342 | 0,354 | 0,360 |
| 0,2                  | 0,324                                                                                | 0,345 | 0,356 | 0,362 |
| 0,4                  | 0,330                                                                                | 0,349 | 0,359 | 0,364 |
| 0,6                  | 0,340                                                                                | 0,354 | 0,363 | 0,368 |
| 0,8                  | 0,355                                                                                | 0,365 | 0,371 | 0,373 |
| 1,0                  | 0,385                                                                                | 0,385 | 0,385 | 0,385 |
| $\eta = \frac{b}{B}$ |  |       |       |       |
|                      | $r/B$                                                                                |       |       |       |
|                      | 0                                                                                    | 0,1   | 0,3   | 0,5   |
| 0,0                  | 0,320                                                                                | 0,342 | 0,354 | 0,360 |
| 0,2                  | 0,324                                                                                | 0,345 | 0,356 | 0,362 |
| 0,4                  | 0,330                                                                                | 0,349 | 0,359 | 0,364 |
| 0,6                  | 0,340                                                                                | 0,354 | 0,363 | 0,368 |
| 0,8                  | 0,355                                                                                | 0,365 | 0,371 | 0,373 |
| 1,0                  | 0,385                                                                                | 0,385 | 0,385 | 0,385 |

Коэффициент расхода  $\mu$  по данным Н.Н. Павловского изменяется в пределах от 0,6 до 0,9. В первом приближении можно считать  $\mu = 0,7$ .

При расчёте таких же отверстий, но для случая истечения воды в “сухой канал (лоток)” (рис. 5) используется зависимость:

$$b\varepsilon_0 = \frac{Q\sqrt{1+\varepsilon\frac{a}{H}}}{\varphi\sqrt{2gH}} \quad (18)$$

где  $\varphi$  – поправочный коэффициент, учитывающий влияние потерь напора,

$b$  – ширина лотка,

$\varepsilon$  – коэффициент сжатия струи.

Значение  $\varphi$  (по А.Д. Альтшулю) приведены в таблице 6.

Таблица 6

|                         |      |      |       |      |            |
|-------------------------|------|------|-------|------|------------|
| $Fr = \frac{V_0^2}{gH}$ | 0    | 0,01 | 0,025 | 0,06 | 0,1 и выше |
| $\varphi$               | 1,06 | 1,0  | 0,97  | 0,96 | 0,96       |

Величина коэффициента сжатия струи (по Н.Е. Жуковскому) при истечении из-под вертикального плоского затвора дана в таблице 7.

Таблица 7

|       |               |       |               |       |               |       |               |
|-------|---------------|-------|---------------|-------|---------------|-------|---------------|
| $Q/H$ | $\varepsilon$ | $Q/H$ | $\varepsilon$ | $Q/H$ | $\varepsilon$ | $Q/H$ | $\varepsilon$ |
| 0,00  | 0,611         | 0,30  | 0,625         | 0,55  | 0,650         | 0,80  | 0,720         |
| 0,10  | 0,615         | 0,35  | 0,628         | 0,60  | 0,660         | 0,85  | 0,745         |
| 0,15  | 0,618         | 0,40  | 0,630         | 0,65  | 0,675         | 0,90  | 0,780         |
| 0,20  | 0,620         | 0,45  | 0,638         | 0,70  | 0,690         | 0,95  | 0,835         |
| 0,25  | 0,622         | 0,50  | 0,645         | 0,75  | 0,705         | 1,00  | 1,000         |

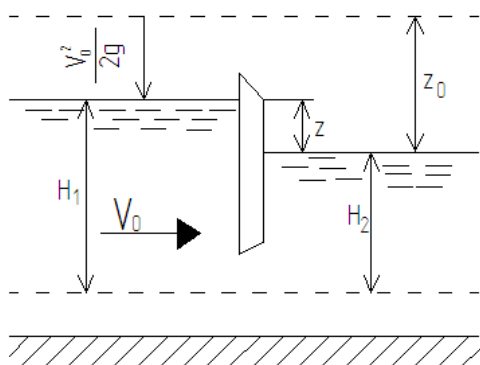


Рис. 4. Расчетная схема истечения из-под затвора “под уровень”

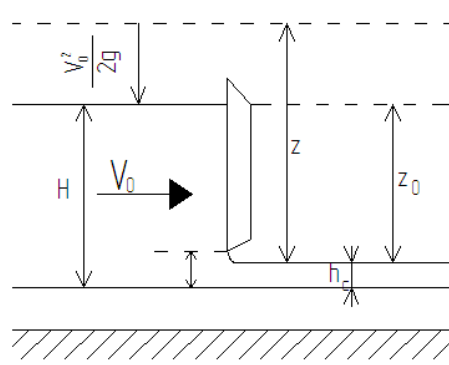


Рис. 5. Расчетная схема истечения из-под затвора в сухой канал (лоток)

## 2. Трубчатые сооружения

Трубчатые сооружения могут проектироваться на пропуск расчётного расхода при безнапорном, полунапорном или напорном режимах.

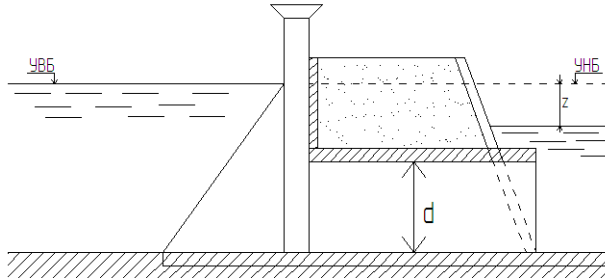


Рис. 6. Расчётная схема трубчатого регулятора, работающего в напорном режиме.

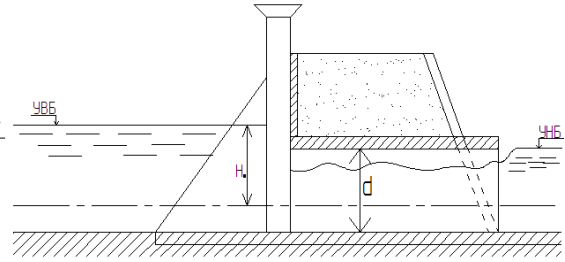


Рис. 7. Расчётная схема трубчатого регулятора, работающего в полунапорном режиме.

Водовыпуски, входящие в состав узлов сооружений, обычно рассчитываются на их работу в напорном режиме, для чего необходимо затопление входного и выходного отверстий трубы (рис. 6). Площадь поперечного сечения трубы  $\omega$  определяется по формуле:

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gz}, \quad (19)$$

где  $Q$  – расчётный расход,

$\mu$  – коэффициент расхода,

$g$  – ускорение силы тяжести,

$z$  – перепад уровней.

Коэффициент расхода трубчатых сооружений, работающих в напорном режиме, равен:

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{\xi_{вх} + \xi_{тр} + \xi_{вых}}} \quad (20)$$

где  $\xi_{вх}, \xi_{тр}, \xi_{вых}$  – коэффициенты сопротивления на вход ( $\xi_{вх} = 0,25-0,40$ ), на трение по длине и выход ( $\xi_{вых} = 0,80-0,85$ ). Коэффициент сопротивления на трение по длине для круглых труб принимается равным:

$$\xi_{тр} = 2gh^2L \left( \frac{4}{d} \right)^{1+2y} \quad (21)$$

где  $n$  – коэффициент шероховатости (для бетонных и железобетонных труб  $n = 0,012-0,014$ ),  $g$  – ускорение силы тяжести,  $L$  – длина трубы,  $d$  – диаметр трубы,  $y$  – показатель степени, принимаемый приближенно равным  $1/6$ .

Поскольку приведенные зависимости не позволяют получить диаметр трубы в явном виде, задача решается подбором или с помощью графиков.

В начальный период работы канала входное отверстие трубы будет затоплено, а выходное – нет. При этом в трубе будет иметь место полунапорный режим (рис. 7). В этом случае пропускная способность сооружения проверяется по формуле:

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH_0}, \quad (22)$$

где  $H_0$  – напор над центром входного отверстия, остальные обозначения – прежние.

В безнапорном режиме обычно работают ливнеспуски и трубы–переезды. Пропускная способность круглых труб определяется по формуле:

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH_0}, \quad (23)$$

где коэффициент расхода  $m = \frac{x}{a+bx}$ ;  $x = \frac{H_0}{d}$ ;  $d$  – диаметр трубы,  $H_0$  – напор на водосливе,  $a$  и  $b$  – постоянные. По Ю.Г. Полубояринову для круглого водослива с прямоугольным входом ребром  $a = 0,83$  и  $b = 2,90$ . Для водослива без бокового сжатия  $a = 0,7$  и  $b = 1,92$ .

### 3. Расчёт быстотоков

Для выпуска воды из магистрального канала в обросши, а иногда, в случае больших уклонов местности, и в оросительные каналы младших порядков применяют перепады и быстотоки.

Быстотоки – это короткие каналы, проводящие воду из верхнего бьефа в нижний по жесткому руслу с уклоном больше критического (рис. 8, 9).

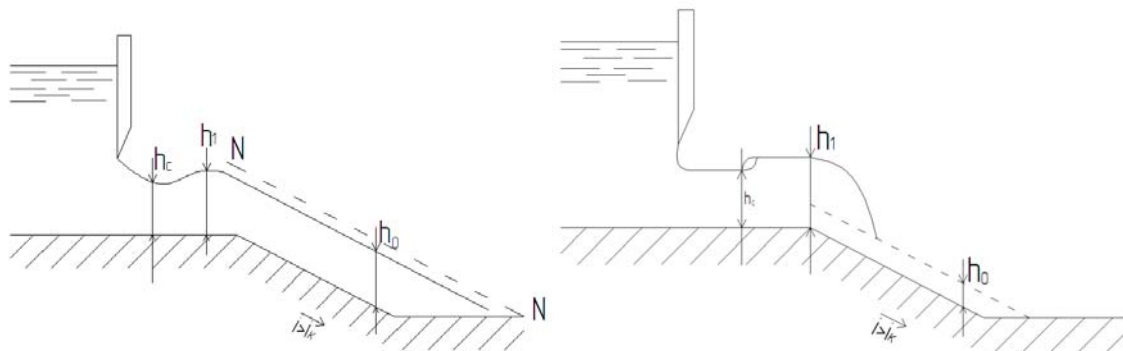


Рис. 8. Варианты свободной поверхности на быстотоках

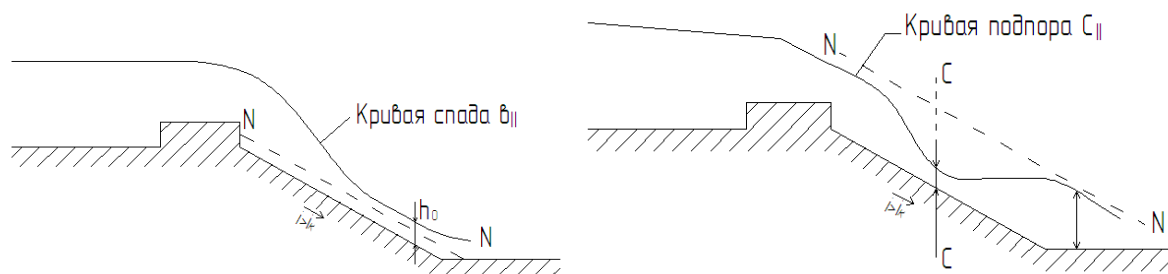


Рис. 9. Кривые свободной поверхности на быстотоке при схеме истечения из-под щита

Размеры водопропускных отверстий быстотоков рассчитываются по зависимости (3) как для неподтопленных водосливов с широким порогом. Гидравлический расчет быстотоков постоянной ширины сводится к построению неравномерного движения Бахметова:

$$\frac{il}{h_0} = \eta_2 - \eta_1 - (1 - \bar{j}) \cdot [\varphi(\eta_2) - \varphi(\eta_1)] \quad (24)$$

При расчёте быстотока переменной ширины (рис. 10) решается одна из следующих задач:

при заданных формах и параметрах русла строится кривая свободной поверхности;

при заданных гидравлических параметрах потока определяются гидравлические характеристики русла (обратная задача).

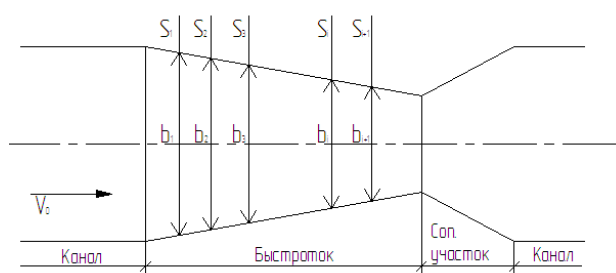


Рис. 10. План-схема быстотока переменной ширины

Наиболее простым является расчет быстротоков с постоянной глубиной по зависимости, предложенной В.Д. Журиным:

$$\Delta S = \left( \frac{\alpha C^2}{g\chi} \right)_{cp} \cdot \frac{b_1 - b_2}{\eta_1 - \eta_2} \cdot [\varphi(\eta_2) - \varphi(\eta_1)] \quad (25)$$

где  $\Delta S = S_i - S_{i+1}$  – длина рассчитываемого участка быстротока,  $C$  – коэффициент Шези,  $g$  – ускорение силы тяжести,  $\chi$  – смоченный периметр,  $b_1, b_2$  – ширина быстротока в сечениях  $S_1, S_2$ ;

$\eta = k/k_0$  – отношение расходной характеристики данного сечения к

характеристике при равномерном движении  $k = \omega c \sqrt{R}$ ;  $k_0 = \frac{Q}{\sqrt{i}}$ .

$\varphi(\eta)$  – функция, определяемая по таблицам для построения кривых подпора и спада при гидравлическом показателе русла  $x = 2,0$ . Решение удобно проводить в табличной форме, предварительно вычислив  $k_0$  и, далее, задаваясь значениями  $b_1, b_2, \dots, b_n$ . В таблице 8 приведена форма для расчета быстротока переменной ширины. По первой и последней графам строится план быстротока (рис. 10).

Таблица 8

| $b_i$ ,<br>м | $\chi$ ,<br>м | $C^2$ | $\frac{\alpha C^2}{g\chi}$ | $\left( \frac{\alpha C^2}{g\chi} \right)^2$ | $K, \text{м}^3/\text{с}$ | $\eta = \frac{K}{K_0}$ | $b_i - b_{i+1}$ ,<br>м | $\eta_i - \eta_{i+1}$ ,<br>м | $\varphi(\eta_i)$ | $\varphi(\eta_i) - \varphi(\eta_{i+1})$ | $\Delta S = S_i - S_{i+1}$ ,<br>м | $S_i$ ,<br>м |
|--------------|---------------|-------|----------------------------|---------------------------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|------------------------------|-------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------|--------------|
| 1            | 2             | 3     | 4                          | 5                                           | 6                        | 7                      | 8                      | 9                            | 10                | 11                                      | 12                                | 13           |

#### Быстротоки с усиленной шероховатостью.

Для уменьшения и стабилизации скорости на быстротоках применяют искусственную шероховатость. Гидравлический расчет усиленной шероховатости заключается в выборе такого типа её, который обеспечивал бы скорость течения, не превышающую предельной –  $V_{\max}$ . Ход расчета быстротоков с усиленной шероховатостью приводится в соответствующей литературе [6].

## 4. Расчёт перепадов

Для преодоления больших разностей в отметках дна старшего и младшего каналов часто устраивают перепады, создающие сосредоточенное падение дна в одном створе (рис. 11,12). Входная часть одноступенчатого перепада обычно представляет собой водослив с широким порогом, поэтому расчет размеров водопропускных отверстий выполняется как для неподтопленных водосливов по формуле (3).

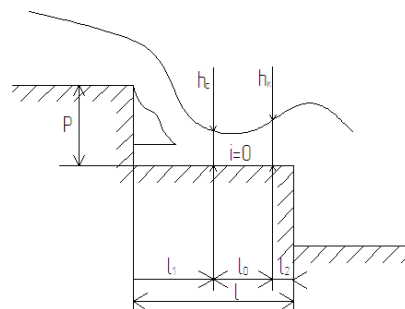
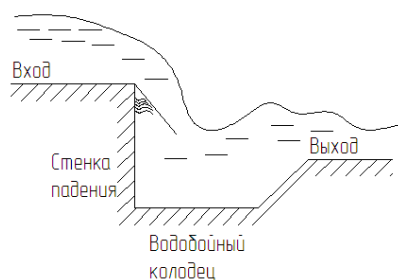


Рис.11. Схема одноступенчатого перепада

Рис.12. Расчетная схема к определению длины ступени перепада

В многоступенчатых перепадах входная часть рассчитывается так же, как и в одноступенчатых, и специальному расчёту подлежит лишь величина падения на каждой ступени устанавливается в зависимости от величины общего перепада.

В месте падения струи на первой ступени в поток образуется сжатое сечение с глубиной  $h_c$  после сжатой глубины на горизонтальной ступени образуется кривая подпора. (рис. 13). Если длина ступени  $l$  недостаточна, то кривая подпора дает в конце ступени глубину  $h < h_k$  и удельная энергия потока в конечном сечении не будет минимальной. Это приводит к накоплению кинетической энергии в потоке и может вызвать перескакивание струи через следующие ступени перепада с возможным разрушением сооружения. Поэтому длину ступени  $l_k$  многоступенчатого перепада без водобойных стенок принимают и такой, чтобы на ней разместилась кривая подпора с глубины  $h_c$  до глубины  $h_k$  с небольшим запасом, то есть

$$l_k = l_1 + l_0 + l_2 \quad (26)$$

где  $l_1$  — дальность полета струи,  $l_0$  — длина кривой подпора,  $l_2$  — запас длины ступени. По предложению В.Д. Журина для большинства случаев дальности полета струи применяются формула

$$l_1 = p + h_k \quad (27)$$

где критическая глубина  $h_k = \sqrt{\frac{\alpha Q^2}{b^2 g}}$  (для прямоугольного сечения), а длина кривой подпора  $l_0$  определяется по упрощенной формуле:

$$l_0 = \frac{1}{i_k} (0,75 h_k - h_0) \quad (28)$$

Где  $i_k$  — критический уклон.



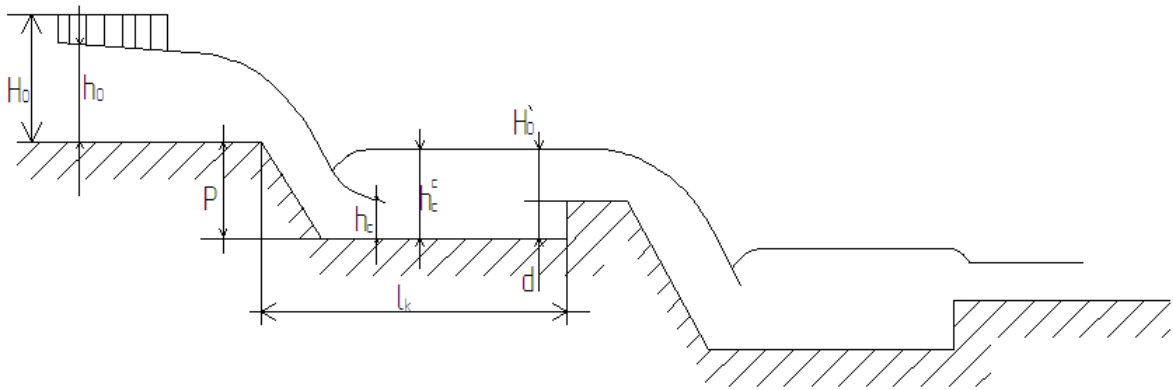


Рис.13. Двухступенчатый перепад ( $n=2$ )

Запас длины ступени принимают  $l_2 = 2h_k$

Порядок расчёта многоступенчатого колодезного перепада (с водобойными стенками) следующий. В качестве исходных данных обычно задается расчётный  $Q$ , форма поперечного сечения подводящего кала (обычно трапециевидная) и его средняя ширина  $B_k$ , ширина перепада  $b$ , глубина в старшем канале  $h_0$ , скорость на входе  $H_0$ , напор на входе с учетом скорости подхода. выбранное число ступеней перепада  $n$ , глубина на ступенях (назначается проектировщиком)

$d$ , высота ступени  $p$  (см.рис. 13).

В начале подбором определяется глубина  $h_c$  в сжатом сечении на дне колодца:

$$h_0 = \frac{q}{\varphi \sqrt{2g(p + H_0 - h_c)}} \quad (29)$$

где  $q = Q/b$  – удельных расход,  $\text{м}^3/\text{см}$ ,  $\varphi$  – коэффициент скорости.

Коэффициент скорости определяется по графикам, приведенным на рис. 14.

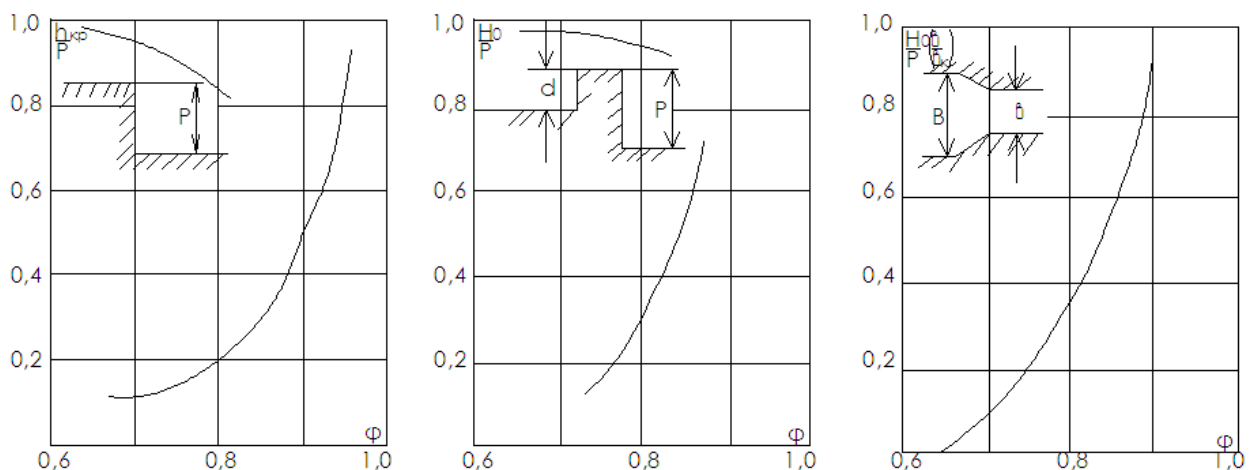


Рис. 14. графики для определения коэффициента  $\varphi$

Затем определяется сопряженная глубина

$$h_c^c = 0,5h_c \left[ \sqrt{1 + \frac{8}{gh_c} \left( \frac{q}{h_c} \right)^2} - 1 \right] \quad (30)$$

и напор над порогом водослива на ступени

$$H'_0 = \left( \frac{q}{m\sqrt{2g}} \right)^{2/3} \quad (31)$$

где коэффициент расхода  $m = 0,42$  принимается как для водослива с острым порогом. Глубина воды на пороге первой ступени

$$H' = H'_0 - \frac{V^2}{2g} = H'_0 - \frac{1}{g} \left( \frac{q}{h^c} \right)^2 \quad (32)$$

Глубина колодца (высота на первой ступени):

$$d' = h^c - H' \quad (33)$$

Величина ...сравнивается с первоначальной принятой и из двух значений выбирается большее (с запасом). Глубина воды в первом колодце:

$$t = d' + H' \quad (34)$$

Коэффициент запаса в глубине колодца:

$$K_3 = \frac{t}{h^c} \quad (35)$$

Вторая и последующие ступени перепада рассчитываются аналогичным образом. Расчёт последней ступени – низового водобойного колодца рассмотрен ниже, в разделе “Расчёт сопряжения бьефов”.

## 5. Сопряжение бьефов

В нижнем бьефе любого из сооружений вододелительного узла необходимо предусматривать надежное крепление.

В общем случае длина крепления определяется как:

$$l_{кр} = l_{от} + l_n + l_{nn} \quad (36)$$

где  $l_{от}$  – дальность отлета струи;  $l_n$  – длина прыжка;  $l_{nn}$  – длина послепрыжкового участка.

Для уменьшения общей длины крепления следует предусматривать мероприятия, обеспечивающие получение за сооружением затопленного прыжка: водобойные колоды, водобойные стенки, зубья, ковши и т.п.

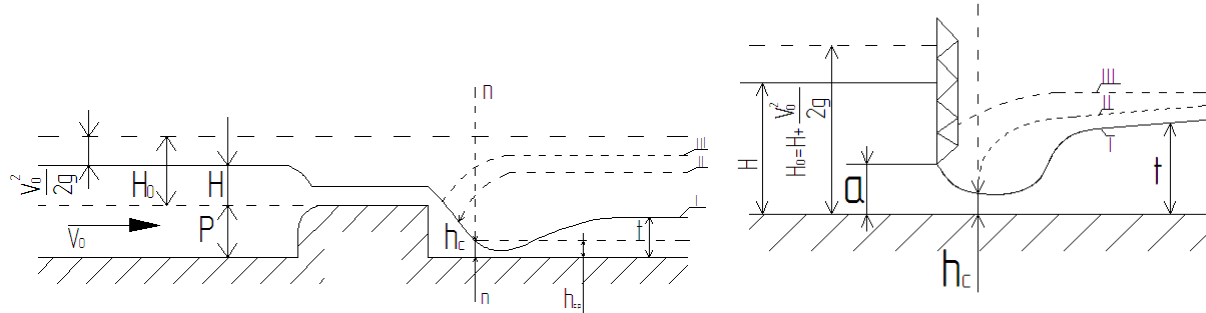


Рис.15. Схемы сопряжения бьефов

Рис.16. Формы сопряжения бьефов в схеме истечения из-под щита

Сопряжение бьефов может быть разделено на следующие основные схемы: схема водослива (рис. 15) и схема истечения из-под щита (рис. 16). Каждая из названных схем может иметь преимущественно донный характер распределения скоростей (небольшие скорости у дна) или поверхностный режим (наибольшие скорости у поверхности).

Во всех случаях сопряжение будет беспрыжковым, если в нижнем бьефе за сооружением русло имеет уклон  $i > i_{кр}$ . И “бытовая” глубина  $t \leq h_{кр}$ . Во всех иных случаях при бытовой глубине  $t > h_{кр}$  Образуется прыжок. На рис. 15 изображены три возможные формы сопряжения при схеме водослива: прыжок отогнана (1), прыжок в критическом положении (2) и прыжок надвинут (3).

Определение формы сопряжения при условии, что удельный расход ..., коэффициент расхода  $q$  и высота порога  $t$  заданы, производится следующим образом.

В начале определяется глубина “сжатого сечения”, то есть глубина потока  $h_c$  в нижнем бьефе в сечении  $n-n$ , причем  $h_c$  определяется из уравнения

$$q = \varphi h_c \sqrt{2g(p + H_0 - h_c)} \quad (37)$$

Которое приводится к кубическому уравнению:

$$(p + H_0)h_c^2 - h_c^3 = \frac{q^2}{\varphi^2 2g} \quad (38)$$

где  $\varphi$  – коэффициент скорости, определяемый по таблице 9.

Таблица 9

| Условия истечения                             | Коэффициент |
|-----------------------------------------------|-------------|
| Истечение через водослив с широким порогом    | 0,95-0,85   |
| Истечение из-под щита или из донных отверстий | 1,00-0,97   |
| Перепады без щитов в головной части           | 1,00        |
| Перепады со щитами в головной части           | 1,00-0,97   |

Уравнение (38) решается или методом подбора или графо-аналитическим построением кривой:

$$y = (p + H_0)h_c^2 - h_c^3 \quad (39)$$

и далее по известному значению  $y = \frac{q^2}{\varphi^2 2g}$  определяется искомая величина в сжатом сечении.

После вычисляется так называемая “раздельная глубина”, равная глубине  $h_c$ , то есть сопряженная с глубиной  $h_c$  в сжатом сечении. Для прямоугольного русла раздельная глубина определяется по формуле:

$$h_{разд} = \frac{h_c}{2} \left[ \sqrt{1 + 8 \left( \frac{h_{кр}}{h_{xc}} \right)} - 1 \right] \quad (40)$$

после чего по условию

$$h_{разд} \begin{matrix} \geq \\ \leq \end{matrix} t \quad (41)$$

решается вопрос о форме сопряжения, а именно: если окажется, что  $h_{разд} > t$ , то будет иметь место первая форма – прыжок отогнана, если  $h_{разд} = t$ , то прыжок в критическом положении, если  $h_{разд} < t$ , то будет иметь место третья форма – прыжок затоплен.

В схеме истечения из-под щита (см. рис.16) также возможны три формы сопряжения, подобные указанным выше в схеме водослива. Какая из этих форм конкретно имеет место, определяется на основании того же критерия (41) с использованием зависимости (40). Определение глубин  $h_c$  в сжатом сечении в данном случае производится по формуле:

$$h_c = \varepsilon a \quad (42)$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент сжатия;  $a$  – высота открытия отверстия. Значения коэффициента сжатия  $\varepsilon$  можно определить по данным Н.Е. Жуковского из таблицы 10.

Таблица

10

| $a/H$         | 0,10  | 0,20  | 0,30  | 0,40  | 0,50  | 0,60  |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\varepsilon$ | 0,615 | 0,620 | 0,625 | 0,630 | 0,645 | 0,660 |

Если при проведении указанных расчетов выяснилось, что в нижнем бьефе имеет место затопленный прыжок, то в этом случае можно назначит длину крепления в соответствии с формулой (36).

По М.Д. Чертоусову для водослива с широким порогом дальность отлета струи определяется как:

$$l_{om} = 1,64H_0(p + 0,24H_0) \quad (43)$$

где  $H_0$  – напор на пороге водослива с учётом скорости подхода;

$p$  – высота ступени падения.

Длина прыжка может быть определена лишь весьма приближенно.

Для практических расчётов могут быть рекомендованы зависимости Д.И.

Кумина:

$$l_n = 6(h_2 + h_c) \quad (44)$$

где  $h_2$  – глубина воды в нижнем бьефе;  $h_c$  – глубина в сжатом сечении;

или М.Д. Чертоусова:

$$l_n = 10,3h_c(\sqrt{Fr_c} - 1)^{0,87} = 10,3h_c \left[ \left( \sqrt{\frac{h_{kp}}{h_c}} \right) - 1 \right]^{0,87} \quad (45)$$

где  $Fr$  – число Фруда в сжатом сечении.

Зависимость (45) легко решается с помощью графика  $l_n/h_c = f(\lambda)$ , где  $\lambda = \sqrt{Fr_c}$ , приведенного на рис.17.

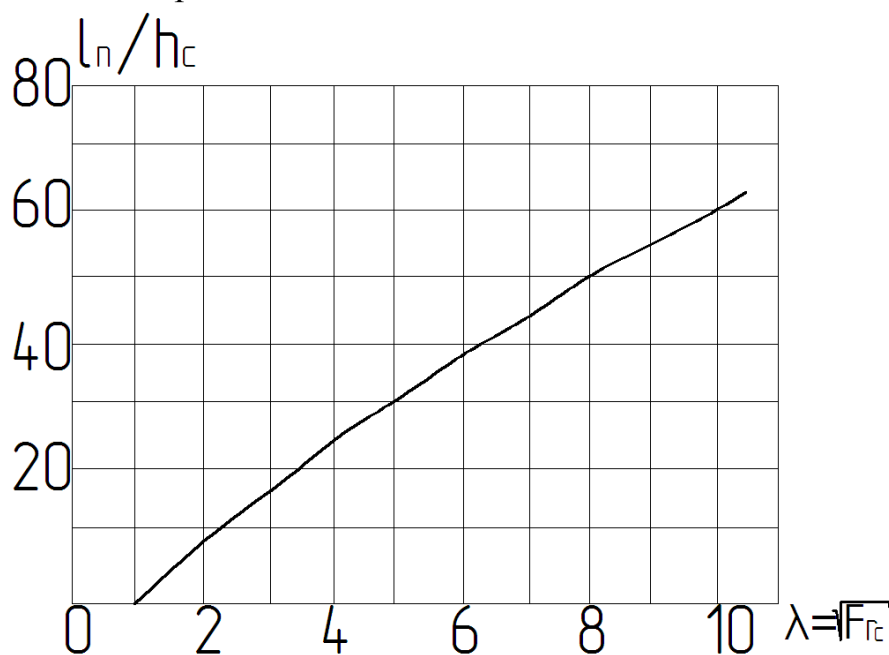


Рис.17. График  $l_n/h_c = f(\lambda)$

На длине  $l_{mn}$  послепрыжкового участка происходит затухание пульсаций до величин, свойственных равномерному движению, а так же выравнивание эпюры осредненных скоростей до той формы, которая также отвечает равномерному движению.

Для практических расчетов можно принимать

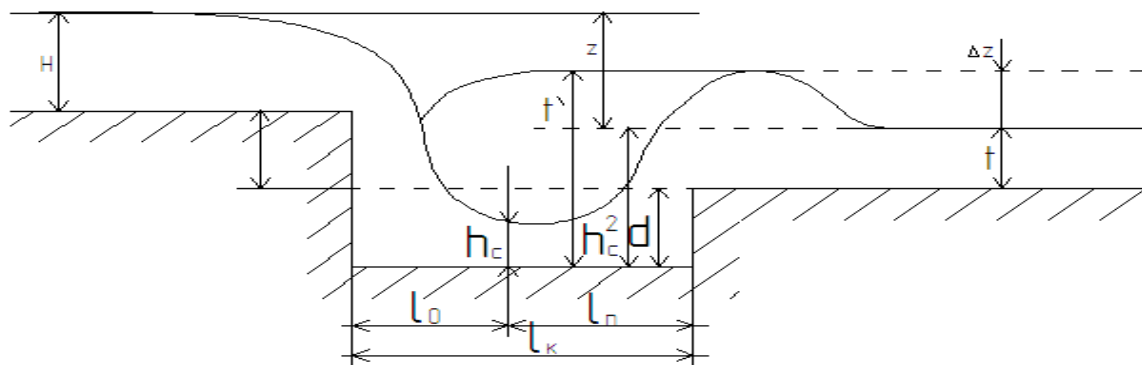
$$l_{mn} \approx (10 \div 15)h_2 \quad (46)$$

где  $h_2$  – глубина в русле за послепрыжковым участком.

## 6. Расчёт водобойного колодца

Для устранения отгона прыжка и для его затопления устраивают водобойные колодцы или водобойные стенки, увеличивающие глубину за сооружением (рис. 18).

а)



б)

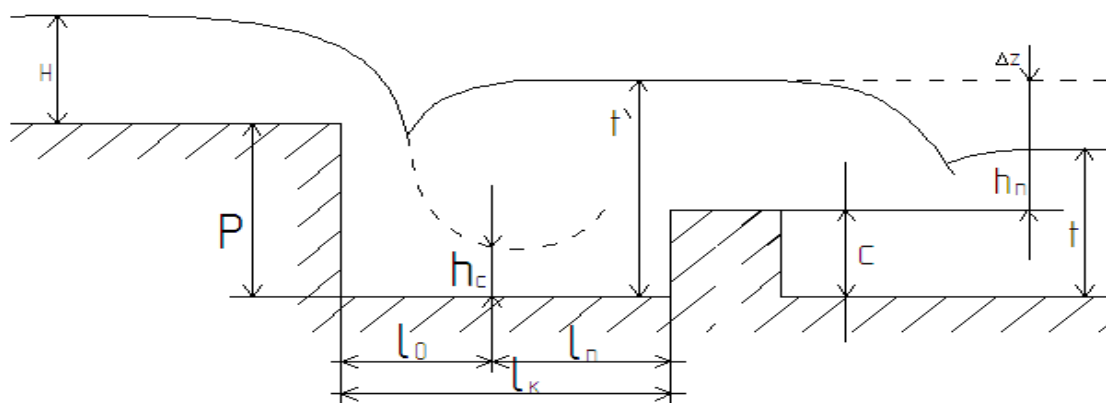


Рис.18. расчетные схемы водобойного колодца (а) и водобойной стенки (б)

Расчёт водобойного колодца определяется из условия получения в нижнем бьефе за сооружением глубины  $t'$ , равной или большей раздельной глубины,  $h_{разд}$  (сопряжение с глубиной сжатого сечения  $h_c$  у дна колодца), то есть по формуле:

$$t' = d + t + \Delta Z \geq h_c^c = h_{разд} \quad (47)$$

Для колодца с прямоугольным поперечным сечением  $h_{разд}$  определяется по формуле (40).

Перепад  $\Delta Z$ , образующийся при выходе потока из водобойного колодца в русло нижнего бьефа, равен

$$\Delta Z = \frac{V_6^2}{\phi^2 2g} - \frac{V_0^2}{2g} \quad (48)$$

где  $\phi = 0,80 - 0,95$  – коэффициент скорости,  $V_6$  – средняя скорость в нижнем бьефе, соответствующая бытовой глубине,  $V_0$  – средняя скорость в водобойном колодце.

Производя расчёт с “запасом”, на практике обычно пренебрегают величиной  $\Delta Z$ , то есть увеличивают минимально необходимую глубину  $t'$ , на 5-10%. Глубину водобойного колодца находят по условию:

$$d = (1,05 \div 1,1) \frac{h_c}{2} \left[ \sqrt{1 + 8 \left( \frac{h_{kp}}{h_c} \right)^3} - 1 \right] \quad (49)$$

Уравнение (49) решается методом последовательного приближения. Для произвольного выбранных значений  $d_1, d_2, \dots$  вычисляются соответствующие значения глубины сжатого сечения  $h_{c1}, h_{c2}, \dots$  и ряд значений  $d'_1, d'_2, \dots$  по формуле (49). Вычисление продолжают до совпадения  $d_n = d'_n$ . Расчёты производить в табличной форме.

Длин водобойного колодца  $L_\kappa$  определяется [6] как

$$L_\kappa = l_{om} + \beta l_n \quad (50)$$

где  $l_{om}$  – дальность отлета струи;  $l_n$  – длина прыжка,  $\beta = 0,7 \div 0,8$ . Значения  $l_{om}$  и  $l_n$  определяются, соответственно, по формулам (43) и (45).

## 7. Водобойный колодец, расширяющийся в плане

Гаситель применяется для одно– и двухочковых трубчатых гидротехнических сооружений при напорном и безнапорном режиме в трубах, а также для открытия сооружений с небольшой шириной водосливного фронта. Настоящая методика расчёта рекомендуется при числах Фруда потока за трубой  $Fr \leq 7$ , степени расширения потока в плане в пределах гасителя  $Fr \leq 6$  и угле расширения  $\delta = 10 \div 30^\circ$ . Расчётная схема приведена на рис. 19.

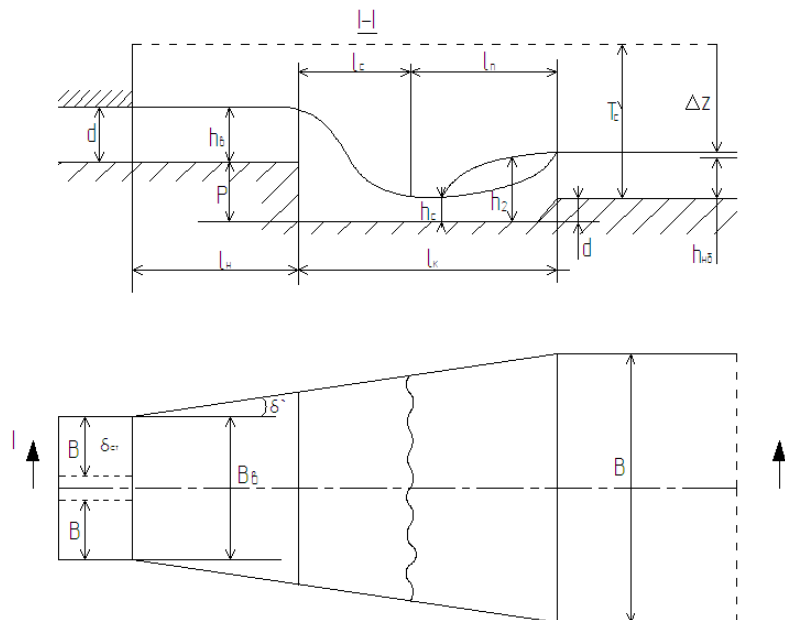


Рис. 19. расчетная схема к гидравлическому расчету водобойного колодца, расширяющегося в плане.

### Порядок расчёта

1. Определяется число Фруда на выходе из трубы:

$$Fr_b = \frac{V_b^2}{gh_b} \quad (51)$$

2. Определяется степень расширения потока в плане:

$$\beta_b = \frac{B}{b_k} \quad (52)$$

где  $b_b$  – ширина потока на выходе из трубы,  $B$  – ширина отводящего канала по урезу воды при двухочковой трубе

$$b_b = 2b_{mp} + \delta_{cm} \quad (53)$$

$\delta_{cm}$  – толщина промежуточной стенки между трубами.

3. Величина перепада между дном трубы и дном отводящего канала принимается такой, чтобы поток, который растекается в воронке перед перепадом, не подтапливался со стороны нижнего бьефа. В случае недостаточной величины перепада будет происходить подтопление потока перед перепадом, что приведет к отрыву потока от стенок, образованию около них водоворотов и возникновению сбойного течения. Колодец в этом случае работает плохо. Высота уступа перепада должна быть не меньше



$$P = (0,6 \div 0,7) h_{нб} \quad (54)$$

4. Назначается длина расширяющейся части порога-перепада.:

$$L_n = 2a \quad (55)$$

где  $a$  – высота трубы.

5. Определяется угол  $\theta$  по графику  $\theta = f(Fr)$  (рис. 20), где  $\theta$  – угол отклонения крайней струи потока от первоначального направления при выходе из трубы.

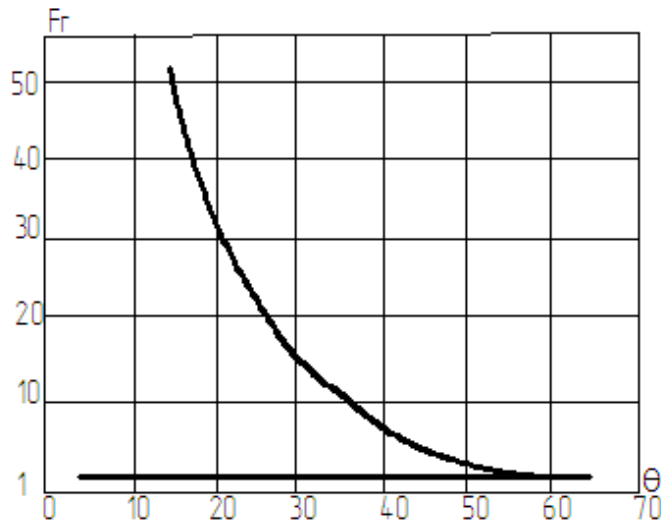


Рис.20. График  $\theta = f(Fr)$

6. Угол расширения воронки “ $\delta$ ” должен удовлетворять зависимости:

$$30^\circ \geq \delta \geq \theta - 10^\circ \quad (56)$$

Величина  $\delta$  назначается по конструктивным соображениям, с учетом необходимой степени расширения потока.

7. определяется средняя глубина воды в сечении на повороте перепада – ...с помощью. Уравнения Бернулли:

$$h_0 + \frac{V_b^2}{2g} = h_y + \frac{V_y^2}{2g} = h_y + \frac{Q^2}{2gh_y^2 b_y^2} \quad (57)$$

где

$$b_y = b_b + 2l_n \tan \delta \quad (58)$$

$h_y$  – находится подбором из уравнения (57).

8. Определяется дальность падения струи:

$$L_c = 2\varphi \left( P + \frac{h_y}{2} \right) \sqrt{\frac{T'_0}{P + \frac{h_y}{2}} - 1} \quad (59)$$

$$T_0 = h_y + \frac{V_y^2}{2g} + P \quad (60)$$

где  $T_0$  – удельная энергия сечения в конце перепада относительно дна колодца,  
 $\varphi$  – коэффициент скорости на водосливе – в данном случае можно принять  
 равным  $0,90 \div 0,95$ .

9. Глубина потока в сжатом сечении за перепадом определяется по формуле:

$$T_0 = h_c + \frac{Q^2}{2g\varphi_c^2 h_c^2 b_c^2} \quad (61)$$

где  $\varphi_c$  – коэффициент скорости в сжатом сечении,  $\varphi_c = 0,9$ , а ширина потока в сжатом сечении за перепадом определяется по формуле:

$$b_c = b_b + (L_n + L_c) 2tg\delta \quad (62)$$

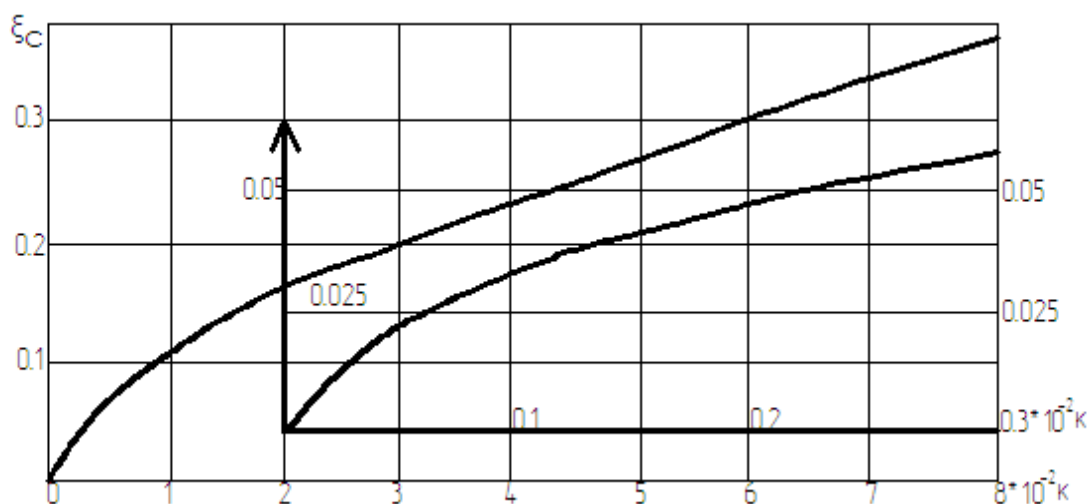


Рис.21. График  $\xi = f(K)$

При решении уравнения (61) можно пользоваться графиком на рис. 21

где  $\xi_c = \frac{h_c}{T_0}$

$$K = \frac{Q^2}{2g\varphi_c^2 b_c^2 T_0^3} \quad (63)$$

10. Определяется число Фруда в сжатом сечении

$$Fr = \frac{V_c^2}{gh_c} = \frac{Q}{gb_c^2 h_c^2} \quad (64)$$

11. Определяется отношение:

$$\beta = \frac{b_c}{h_c} \quad (65)$$

12. По одному из графиков на рис. 22–24 определяется величина:

$$\eta = \frac{h_2}{h_c} \quad (66)$$

Величина  $\eta$  определяется в зависимости от  $Fr$  и  $\beta$  при заданном “ $\delta$ ”.

13. По величине “ $\eta$ ” определяется вторая взаимная глубина при прыжке:

$$h_2 = \eta h_c \quad (67)$$

14. Характер сопряжения бьефов за перепадом определяется соотношением величин  $h_{нб}$  и  $h_2$ . Если  $h_2 > h_{нб}$ , то прыжок отогнан и необходим водобойный колодец.

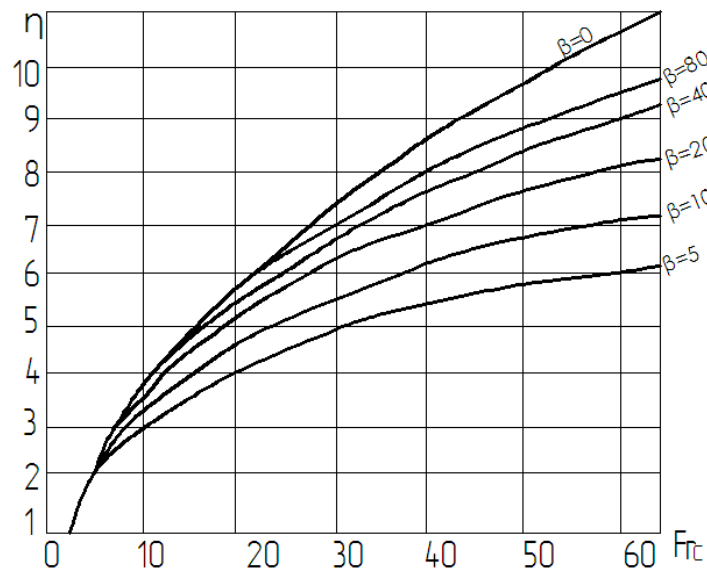


Рис.22. График  $\eta = f(Fr_c; \beta)$  при  $\delta = 30^\circ$

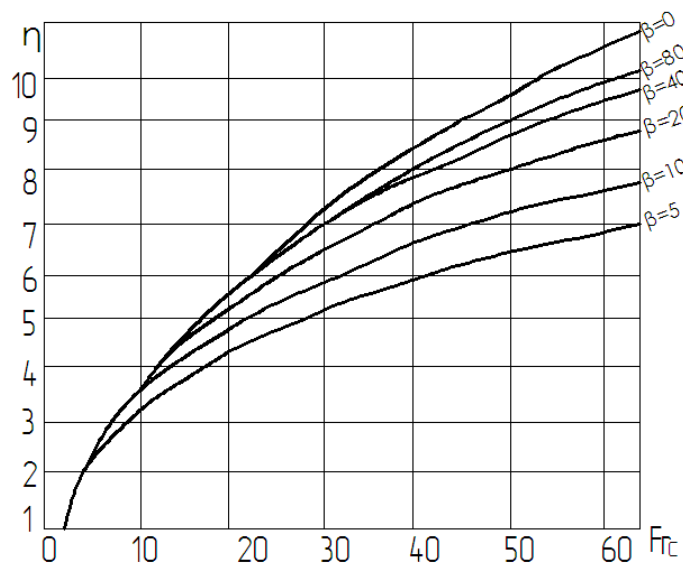


Рис. 23. График  $\eta = f(Fr_c; \beta)$  при  $\delta = 20^\circ$

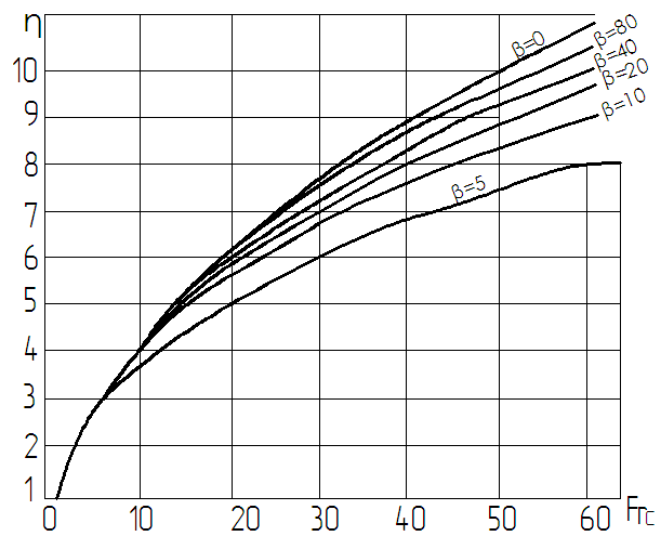


Рис. 24. График  $\eta = f(Fr_c; \beta)$  при  $\delta = 10^\circ$

15. Глубина расширяющегося в плане водобойного колодца определяется по формуле:

$$d_k = nh_2 - h_n \delta \quad (68)$$

где  $n = 0,05 \div 1,1$  – коэффициент запаса.

16. Для обеспечения равномерного выхода потока глубина водобойного колодца должна быть не менее:  $d_y \geq 0,6h_{kk}$ , где  $h_{kk}$  – критическая глубина потока в конце колодца:

$$h_{kk} = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{gb_2^2}} \quad (69)$$

В случае, если  $d_g > d_k$ , устраивается комбинированный колодец, образованный частично заглублением его днища, на глубину  $d_c$  и частично водобойной стенкой высотой:

$$C = d_g - d_k \quad (70)$$

17. Если для затопления прыжка за перепадом водобойного колодца не потребуется (при  $h_2 \leq h_{нб}$ ), то для выравнивания скоростей потока по ширине необходимо устройство водобойной стенки высотой

$$C = 0,6h_{kc} \quad (71)$$

где  $h_{kc}$  – критическая глубина в месте установки водобойной стенки.

18. Длина расширяющегося в плане водобойного колодца определяется по эмпирической формуле:

$$l_k = l_c + (2 \div 3)h_{np} \quad (72)$$

где  $h_{np} = h_2 - h_c$  – высота пространственного прыжка.

Коэффициент “2” рекомендуется при расчёте водобойных колодцев, коэффициент “3” – водобойных стенок; в случае комбинированного колодца вводится коэффициент – 2,5.

19. Расчёт крепления за расширяющимся в плане водобойным колодцем;  
а) назначается общая длина крепления за расширяющимся в плане водобойным колодцем при  $\beta \leq 4 \div 6$

$$l_{kh} = (8 \div 12) \quad (73)$$

б) определяется максимальная придонная скорость по приближенной формуле:

$$V_{\text{макс.г}} = \frac{2,16}{\lambda^{1/6}} V_{cp} = \frac{2,16}{(l/h_{нб})^{1/6}} V_{cp} \quad (74)$$

Где  $V_{cp}$  – средняя скорость в отводящем русле,  $l$  – расстояние от конца гасителя рассматриваемого сечения,  $h_{нб}$  – глубина воды в отводящем русле, соответствующая неразрывающейся скорости при пропуске расчетного расхода. При получающихся обычно за расширяющимся колодцем максимальных донных скоростях ( $V_{\text{макс.г}}$ ) может потребоваться только крепление камнем;

в) размер камня верхнего слоя крепления назначается в зависимости от  $V_{\text{макс.г}}$  (табл.11).

Таблица 11

| Придонная скорость | 1    | 2       | 3     | 4      | 5       |
|--------------------|------|---------|-------|--------|---------|
| Диаметр камня, см  | 3    | 10-12   | 25-30 | 40-50  | 65-75   |
| Масса камня, кг    | 0,04 | 1,4-2,5 | 22-37 | 78-138 | 380-585 |

г) на половину длины крепления  $l_{\text{кк}}$  осуществляется переход к другой толщине камня.

20. Глубина воронки размыва в конце крепления определяется по формуле:

$$h_p = 0,84 \sqrt{\frac{V_{\text{макс.г}} h_{\text{нб}} (1 + \mu)}{V_{n=1}}} \quad (75)$$

где  $V_{n=1}$  – допустимая неразмывающая скорость для грунта, слагающего русло при глубине  $h = 1\text{м}$

$$\lambda = \frac{l}{h_{\text{нб}}}$$

$l$  – расстояние от гасителя до рассматриваемого сечения.

В зависимости от  $\lambda$  и  $\beta$  по графику (рис. 25) определяется величина  $\mu$ , которая подставляется в формулу (75).

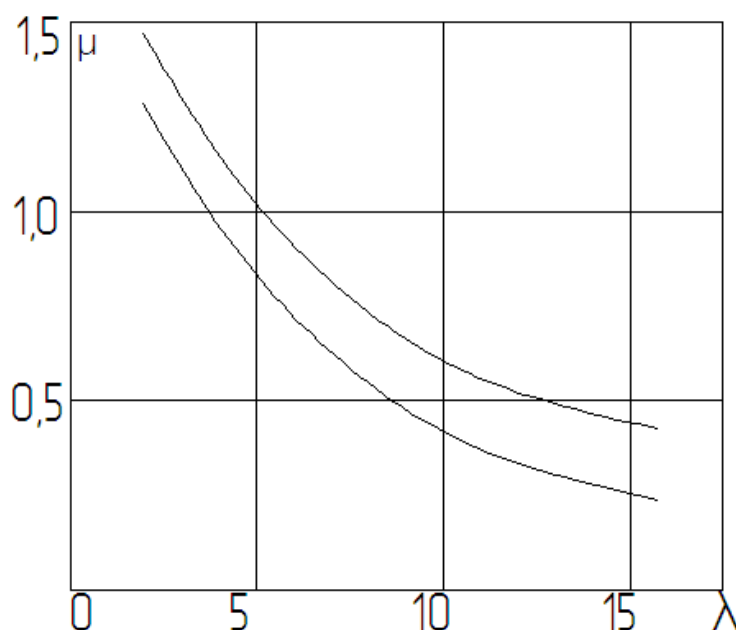


Рис. 25. График  $\mu = H_{\text{макс}}/V_{\text{ср.г}} = f(\lambda)$ ; 1 – при  $\beta = 2$ , 2 – при  $\beta = 5$

21. В конце крепления назначается зуб. Объем камня в зубе должен быть достаточным, чтобы покрыть верховой откос воронки размыва, заложение которого принимается  $m = 3$ .

#### Список литературы:

1. Курсовое и дипломное проектирование по гидротехническим сооружениям/ Под ред. В.С.Лапшенкова. - М.: Агропромиздат, 1989. – 448 с.
2. Мелиорация и водное хозяйство. 4. Сооружения: Справочник/ Под ред. П.А.Полад-заде. – М.: Агропромиздат, 1987. – 464 с.
3. СНиП П–50–74. Гидротехнические сооружения речные. Основные положения. – М. : Стройиздат, 1975.
4. Гидротехнические сооружения: Справочник проектировщика. – М.:Стройиздат.1983.
5. Дементьев В.Г. Орошение. – М.: колос,1979.
6. СНиП П–52-74. Сооружения мелиоративных систем. Госстрой СССР. – М.: Стройиздат, 1975.
7. Указания по проектированию гидротехнических сооружений на каналах оросительных систем. Минводхоз СССР. –М.: Союзводпроект, 1976.
8. Киселев П.Г. Справочник по гидравлическим расчетам.–М.: энергия, 1974
9. Розанов Н.П. Гидротехнические сооружения. – М.: Стройиздат, 1978.