

Министерство образования и науки Украины
Министерство образования и науки, молодежи и спорта Украины
Харьковский национальный университет городского хозяйства
Харьковская национальная академия городского
имени А.Н. Бекетова
ХОЗЯЙСТВА

Кафедра водоснабжения, водоотведения и очистки вод
Дисциплина – «Специальные вопросы гидравлики,
водопроводных и водоотводящих сооружений»

ЛЕКЦИЯ № 3
«Гидравлический прыжок.
Сопряжение бьефов»

Преподаватель: доц. Шевченко Тамара Александровна

Харьков - 2014

Определение сопряженных глубин прыжка

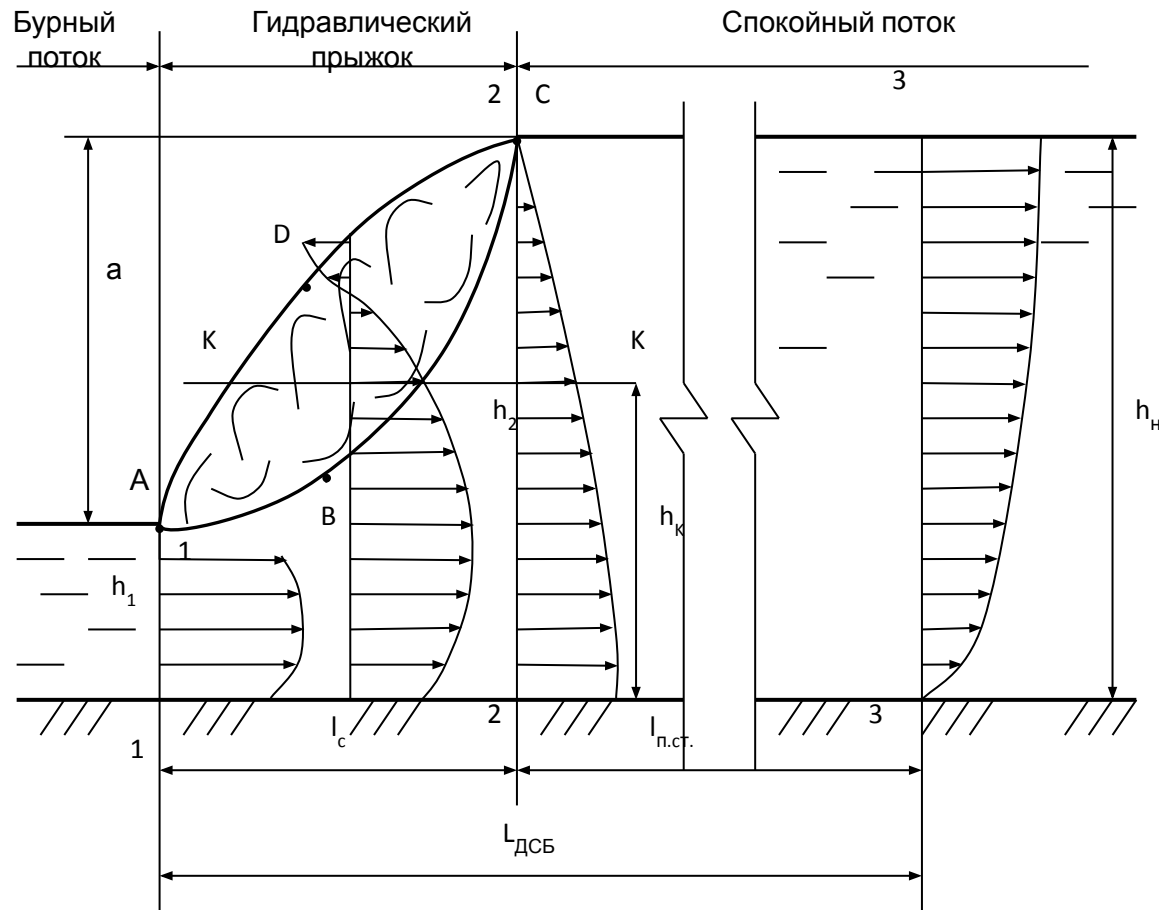
Гидравлическим прыжком называется резкое возрастание глубины потока с переходом от бурного до спокойного состояния на относительно небольшой длине русла.

До прыжка глубина $h_1 < h_k$ (h_k – критическая глубина), а в конце прыжка глубина потока $h_2 > h_k$ (рис. 3.1).

Экспериментальными исследованиями выявлено, что в гидравлическом прыжке можно выделить 2 зоны (рис. 3.1):

1. **Основная струя;**
2. **Поверхностный вихрь (водоворот).**

Линия разграничения этих двух частей ABC – это усредненная во времени линия, которая условно отсекает основной поток с расходом Q от поверхностного водоворота.



Глубины h_1 и h_2 до и после гидравлического прыжка называются **взаимными или сопряжёнными глубинами**, а их разность $(h_2 - h_1)$ определяет высоту гидравлического прыжка.

Длина L участка, на котором происходит резкое изменение глубин потока, называется **длиной гидравлического прыжка**.

Обычно гидравлический прыжок возникает при протекании воды через возвышение на дне русла, при вытекании из-под щита или перетекании через водослив.

Основная задача при расчёте гидравлического прыжка:

- определение взаимных глубин,
- длины гидравлического прыжка,
- сопровождающих гидравлический прыжок потерь энергии.

Взаимные глубины определяются соотношением:

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8v_1^2 / gh_1} - 1 \right) = f(Fr),$$

где Fr - **число Фруда**,
 g - ускорение силы тяжести.

Длина гидравлического прыжка определяется по эмпирическим формулам, например, для прямоугольных русел по формуле Н. Н. Павловского:

$$L = 2,5 (1,9 h_2 - h_1).$$

Потери энергии в гидравлическом прыжке в этом случае

$$\Delta E = (h_2 - h_1)^3 / 4h_1h_2$$

При больших числах Фруда ($Fr > 2,5$) эти потери составляют свыше 50%, т. е. гидравлический прыжок - хороший гаситель энергии. Поэтому гидравлический прыжок используется в гидротехнике, например для защиты от размывов нижнего бьефа плотин. Так, если истечение воды через гидротехническое сооружение происходит с образованием отогнанного гидравлического прыжка, т. е. отодвинутого на некоторое расстояние от сооружения, то во избежание размывов дна ниже сооружения устраивают водобойные колодцы, стенки, чтобы приблизить гидравлический прыжок к сооружению (т. е. превратить его в затопленный).

Вдоль гидравлического прыжка изменяется эпюра скоростей. На рис. 3.1 изображены схемы эпюр усредненных скоростей в сечениях:

- в начале прыжка (где глубина h_1),
- в середине длины прыжка
- и в конце прыжка (где глубина потока h_2).

Как видно из рис. 3.1 в конце прыжка усредненные скорости (точка С) равны нулю, а возле дна они максимальны. Трансформация эпюр скоростей продолжается на некоторой длине $l_{н.см.}$ (до сечения 3-3), которая называется длиной послепрыжкового участка. За сечением 3-3 вниз по течению эпюры скоростей отвечают распределению скоростей при равномерном или неравномерном движении. Если глубина вдоль потока в нижнем бьефе за сечением 3-3 $h_n = const$, то эпюра скоростей является постоянной.

Длина трансформации эюр скоростей между сечениями 1-1 и 3-3 называется участком сопряжения бьефов, который в общем случае равен:

$$L_{ДСБ} = l_C + l_{ПСТ} = l_C + (10...30)h_H$$

где: l_C – длина гидравлического прыжка;

$l_{ПСТ}$ – длина послепрыжкового участка;

h_H – глубина потока в нижнем бьефе.

Сопряженные глубины совершенного гидравлического прыжка в призматических руслах с любой формой поперечного сечения можно определить с помощью графика *прыжковой функции* (рис. 3.2).

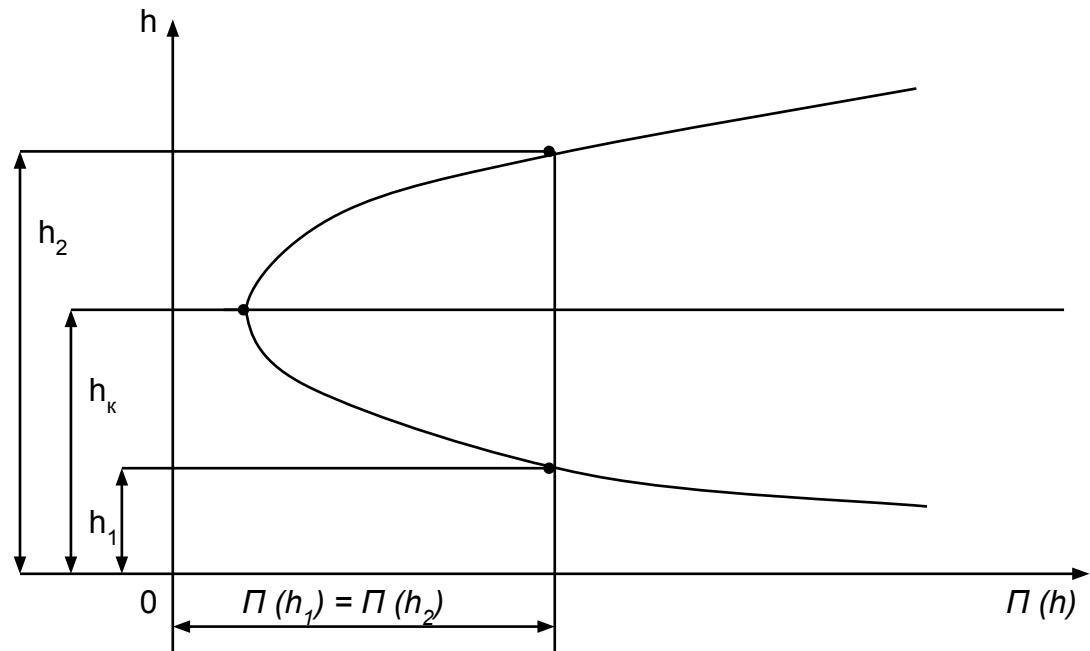
$$\frac{\alpha Q^2}{g\omega} + y_c \cdot \omega = \Pi(h)$$

где: ω – площадь живого сечения потока с глубиной h ,

y_C – глубина погружения геометрического центра площади ω .

Функция $\Pi(h)$ называется

прыжковой функцией.



Длина гидравлического прыжка.

Геометрические размеры волнового прыжка

Длину совершенного гидравлического прыжка в прямоугольном русле при $b = const$ и уклоне дна $i = 0$ можно определить по формулам:

М.Д. Чертоусова

$$l_c = 10,3h_1 \left(\sqrt{Fr_1} - 1 \right)^{0,81}$$

С.К. Кузнецова

$$l_c = 16,7(h_K - h_1)$$

А.Н. Айвазяна

$$l_c = \frac{8 \cdot (10 + \sqrt{Fr_1})}{Fr_1} \cdot \frac{(h_2 - h_1)^3}{4h_1 \cdot h_2}$$

где: h_1, h_2 – первая и вторая сопряженные глубины прыжка;
 Fr_1 – число Фруда, которое посчитано по формуле

$$Fr_1 = \frac{\alpha_1 \cdot V_1^2}{gh_1} \approx 3$$

Длину гидравлического прыжка в прямоугольном расширяющемся русле можно определить по **формуле А.Ф. Васильева**

$$l_{CP} = \frac{l_c}{\left[1 + 0,052 \left(\frac{l_c}{r} \right) \right]}$$

где l_c – длина прыжка в
прямоугольном русле при

$$Fr_1 = \frac{\alpha}{gh_1^3} \left(\frac{Q}{\beta \cdot r} \right)^2$$

где:

$$r = b_1 / \left[2 \sin \left(\frac{\beta}{2} \right) \right]$$

b_1 – ширина дна при глубине h_1 ;

$\beta = \beta^\circ / 57,3$ – угол расширения, рад.

При углах расширения $\beta < 15^\circ$ имеем $\beta r \approx b_1$. Тогда

$$Fr_1 = \frac{Q^2}{gb_1^2 h_1^3} = \left(\frac{h_{K1}}{h_1} \right)^3$$

Длину прыжка в трапецевидном русле с постоянной шириной дна можно определить по формуле **С. Мейерова**

$$l_{пт} = l_c \left(1 + 1,76 \frac{m(h_2 - h_1)}{\chi_1} \right)$$

где: l_c – длина прыжка в прямоугольном русле;

χ_1 – смоченный периметр в сечении с глубиной h_1 ;

m – коэффициент заложения откосов канала.

Длину прыжка в руслах с уклоном дна $i > i_k$ приближенно можно определить по формуле

$$l_{ст} = l_c (1 + k \cdot i)$$

где: l_c – длина прыжка при $i = 0$;

k – коэффициент увеличения длины прыжка при $i > 0$.

По данным **Г.М. Косяковой** $k = 3$, а по данным **Г.К. Илчева** $k = 3,75$.

Глубину под гребнем первой волны в прямоугольном русле при $b = const$ приблизительно можно определить по формуле **С.К. Кузнецова**

$$l_{сх} = 13,4(h_k - h_1)$$

Если число $Fr_1 = (1,5...3)$, то наибольшую глубину волнового прыжка $h_{\text{ВОЛН}}$ можно определить по формуле **М.С. Краснитского**

$$h_{\text{ВОЛН}} = h_1 [1 + 0,72(Fr_1 - 1)]$$

Соотношение между сопряженными глубинами волнового прыжка
По исследованиям **А.А. Рябенко** можно определить по формуле

$$\eta_2 = h_2 / h_1$$

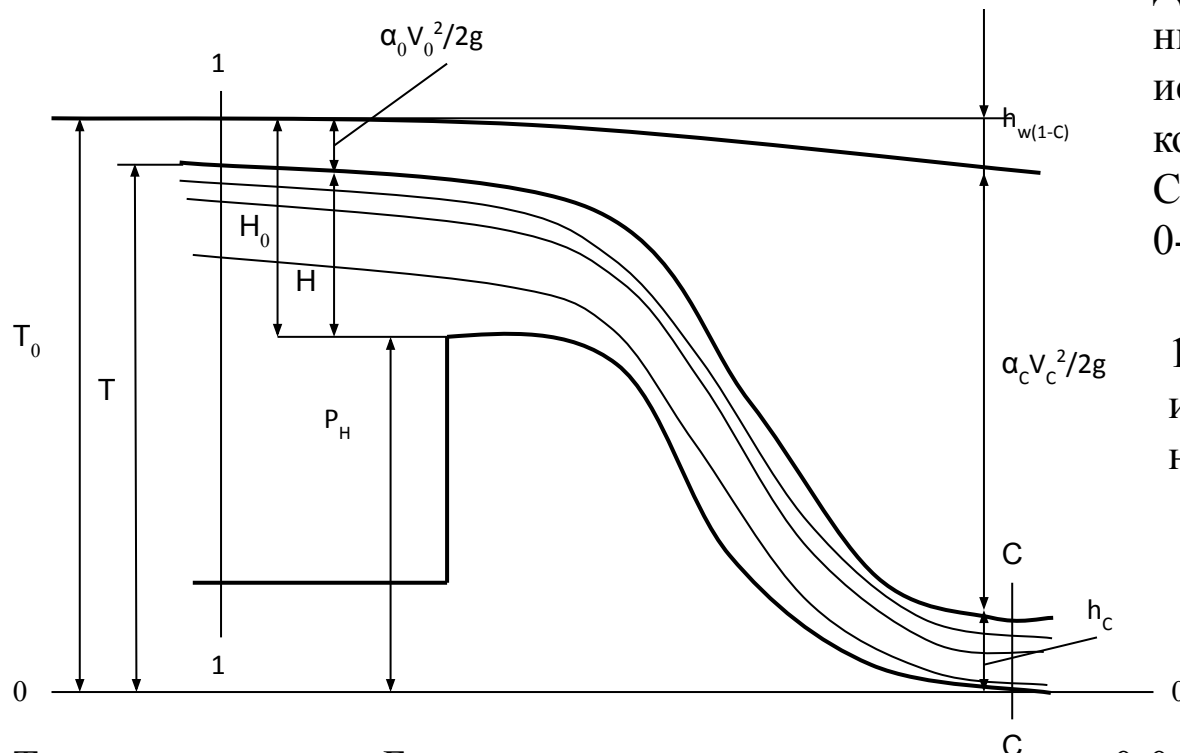
$$\eta_2 = \frac{1}{3} \left[2\beta_1 + Fr_1 - \sqrt{(2\beta_1 + Fr_1)^2 - 3(2\beta_1 + Fr_1 - 1)} \right]$$

По исследованиям **А.А. Рябенко** при числах $Fr_1 > 2$ можно принимать, что $\beta_1 = 1$, а при $Fr_1 = (1,1...1,5)$ - $\beta_{1\text{max}} = 1,045$.

В случае, когда $\beta_1 = 1$, то

$$\left. \begin{aligned} h_2 &= \frac{1}{3} h_1 (1 + Fr_1) \\ h_{\text{XB}} &= h_1 \cdot Fr_1 \end{aligned} \right\}$$

Определение наименьшей глубины за сооружением в нижнем бьефе



Тогда уравнение Бернулли относительно плоскости 0-0 приобретает вид:

$$T + \frac{\alpha_0 V_0^2}{2g} = h_c + \frac{\alpha_c V_c^2}{2g} + h_{w(1-C)}$$

Для определения глубины h_c в нижнем бьефе сооружений используем уравнение Бернулли, которое запишем для сечений 1-1 и C-C относительно плоскости сравнения 0-0

Допустим, что в живых сечениях 1-1 и C-C движение плавно изменяющееся и пьезометрические напоры равны:

$$\left. \begin{aligned} H_{п1} = z_1 + \frac{P_1}{\rho g} = T; \\ H_{п2} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} = h_c. \end{aligned} \right\}$$

$$T_0 = h_c + \frac{V_c^2}{2g} (\alpha_c + \xi)$$

где: T_0 – полная удельная энергия потока в сечении 1-1

$$T_0 = T + \frac{\alpha_0 V_0^2}{2g}$$

V_0 – средняя скорость потока в сечении 1-1;

$V_c = Q / \omega_c$ - средняя скорость потока в сечении С-С;

ω_c – площадь живого сечения потока при глубине h_c ;

ξ – коэффициент гидравлических сопротивлений между сечениями 1-1 та С-С.

Из уравнения:

$$T_0 = h_c + \frac{V_c^2}{2g} (\alpha_c + \xi) \Rightarrow V_c = \varphi_c \sqrt{2g(T_0 - h_c)}$$

где φ_c – коэффициент скорости

$$\varphi_c = \frac{1}{\sqrt{\alpha_c + \xi}}$$

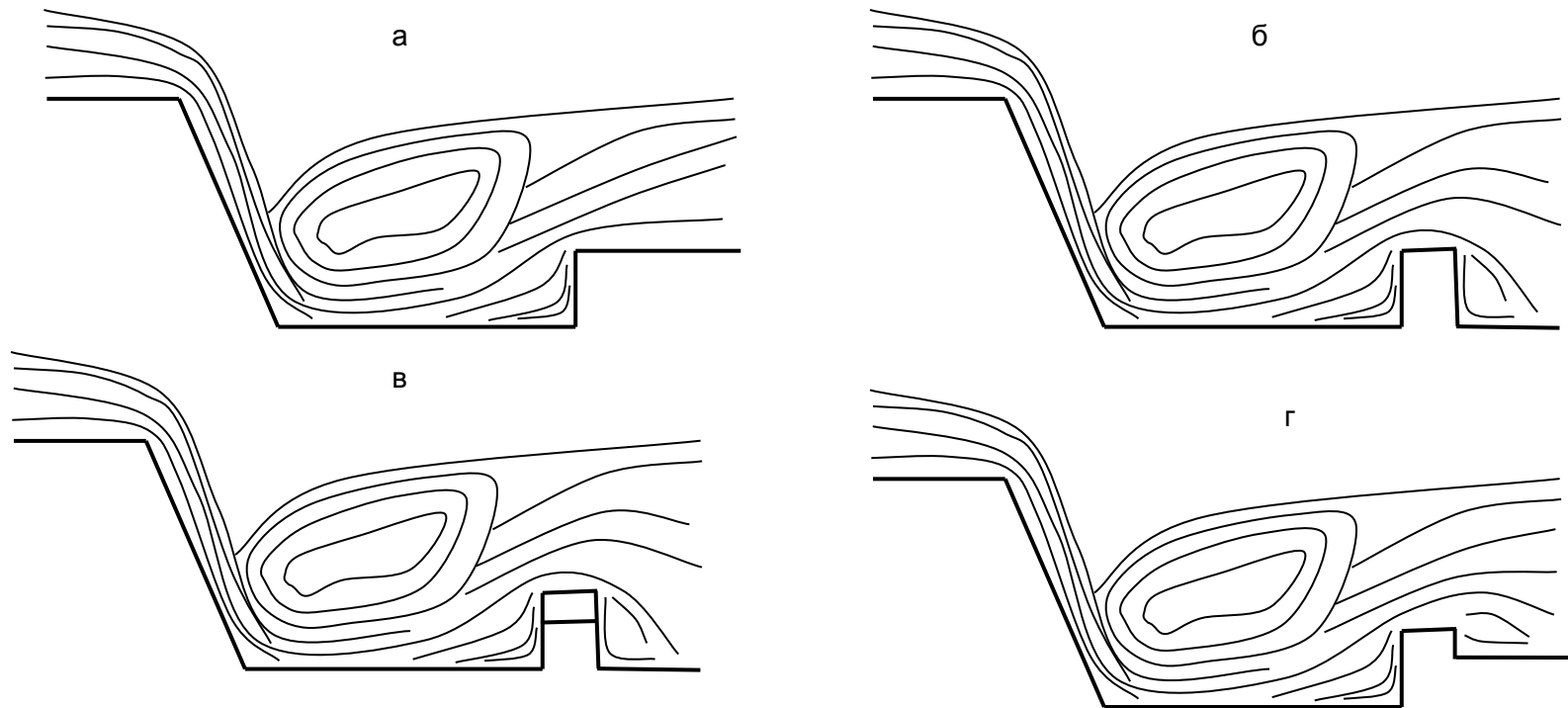
Величина коэффициента φ_c зависит от типа и геометрических размеров сооружения и гидравлических параметров потока.

Учитывая, что $V_c = Q / \omega_c$

$$Q = \varphi_c \omega_c \sqrt{2g(T_0 - h_c)}$$

Это общее уравнение для определения глубины h_c в стесненном сечении в нижнем бьефе гидротехнического сооружения.

Гидравлический расчет водобойной стенки



Для уменьшения кинетической энергии потока в нижних бьефах гидротехнических сооружений используют специальные конструкции, которые называются гасителями энергии.

К самым простым гасителям принадлежат:

водобойные стенки (сплошные (схема б) и прорезные (схема в)),

водобойные колодцы (схема а),

окомбинированные водобойные колодцы (схема г).

Для определения высоты водобойной стенки допускают, что она работает как некоторый водослив. Соответственно высота стенки:

$$C = \sigma_3 \cdot h_2 - H_c$$

где: $\sigma_3 = 1,05 \dots 1,1$ – коэффициент затопления гидравлического прыжка;

h_2 – вторая сопряженная глубина прыжка при расходе Q_p ;

H_c – напор над водобойной стенкой, который определяют по формуле:

$$H_c = \left(\frac{Q_p}{\sigma_n \cdot m_c \cdot B_{CT} \cdot \sqrt{2g}} \right)^{2/3}$$

где: B_{CT} – длина стенки;

$\sigma_n = f(h_n / H_c)$ – коэффициент подтопления водобойной стенки со стороны нижнего бьефа;

h_n – глубина подтопления стенки

$$h_n = h_n - C$$

m_c – коэффициент расхода водобойной стенки как водослива. Он зависит от типа водобойной стенки (сплошная, прорезная) и ее размеров и напора H_c .

Так как перед началом расчетов неизвестно:

- *водобойная стенка подтопленная или неподтопленная,*
- *соответственно неизвестно значение и коэффициента подтопления стенки σ_n ;*
- *неизвестно также значение коэффициента расхода m_c , потому что $m_c = f(C, H_c)$.*

В этом случае высоту водобойной стенки можно определить графоаналитическим способом. Ход расчетов может быть таким:

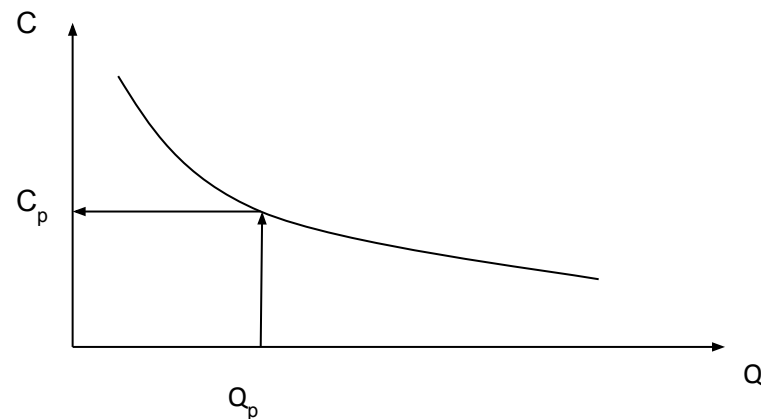
- задаются несколькими значениями высоты стенки C ;
- рассчитывают величины H_c , h_n , m_c , σ_n и определяют расходы.

$$Q = \sigma_n \cdot m_c \cdot B_{CT} \sqrt{2g} \cdot H_c^{3/2}$$

Результаты расчетов целесообразно сводить в следующую таблицу:

C	$H_c = \sigma_3 \cdot h_2 - C$	$h_n = h_n - C$	σ_n	m_c	Q
C_1					$Q_1 < Q_p$
C_2					Q_2
C_3					$Q_3 > Q_p$

По данным этой таблицы строят график $C = f(Q)$, с помощью которого определяют высоту стенки C .



Расстояние до водобойной стенки от сечения с глубиной h_1 определяют по формуле

$$l_K = \beta \cdot l_C$$

где: l_C – длина гидравлического прыжка;

$\beta = 0,7 \dots 0,9$ – коэффициент уменьшения гидравлического прыжка.

Если водобойная стенка высокая, то за ней может образоваться **отогнанный гидравлический прыжок**. Возможность образования этого явления проверяют таким образом: используя следующую формулу определяют сжатую глубину за стенкой:

$$h_{C1} = \frac{Q}{\varphi_C \cdot B_{CT} \sqrt{2g \cdot (T_{0C} - h_{C1})}}$$

где: φ_C – коэффициент скорости, который учитывает потери энергии при переливе потока через водобойную стенку;

T_{0C} – полная удельная энергия потока относительно дна нижнего бьефа за стенкой

где: $\alpha = 1,1 \dots 1,2$ – коэффициент кинетической энергии потока в сечении с глубиной $h = \sigma_3 h_2$;

B_{CT} – длина водобойной стенки.

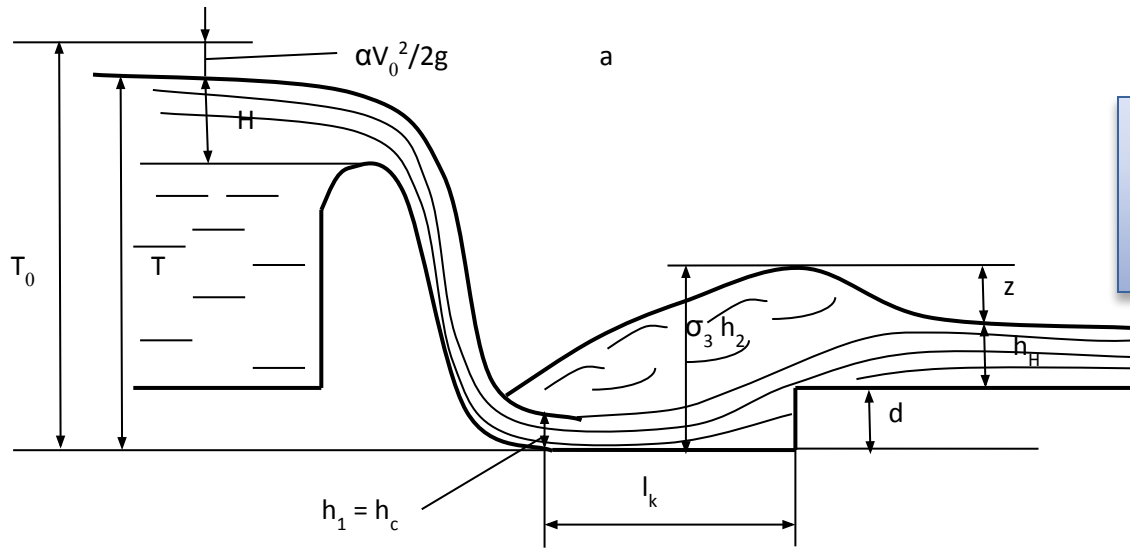
$$T_{0C} = \sigma_3 \cdot h_2 + \frac{\alpha Q_p^2}{2g(B_{CT} \cdot \sigma_3 \cdot h_2)^2}$$

Принимая, что первая сопряженная глубина прыжка $h_1 = h_{C2}$, по уравнением гидравлического прыжка определяют вторую сопряженную глубину прыжка h_2 . Если $h_2 > h_H$, то за стенкой **прыжок отогнанный** и необходимо запроектировать другую водобойную стенку или вместо водобойных стенок взять другой гаситель энергии, например, водобойный колодец или комбинированный водобойный колодец..



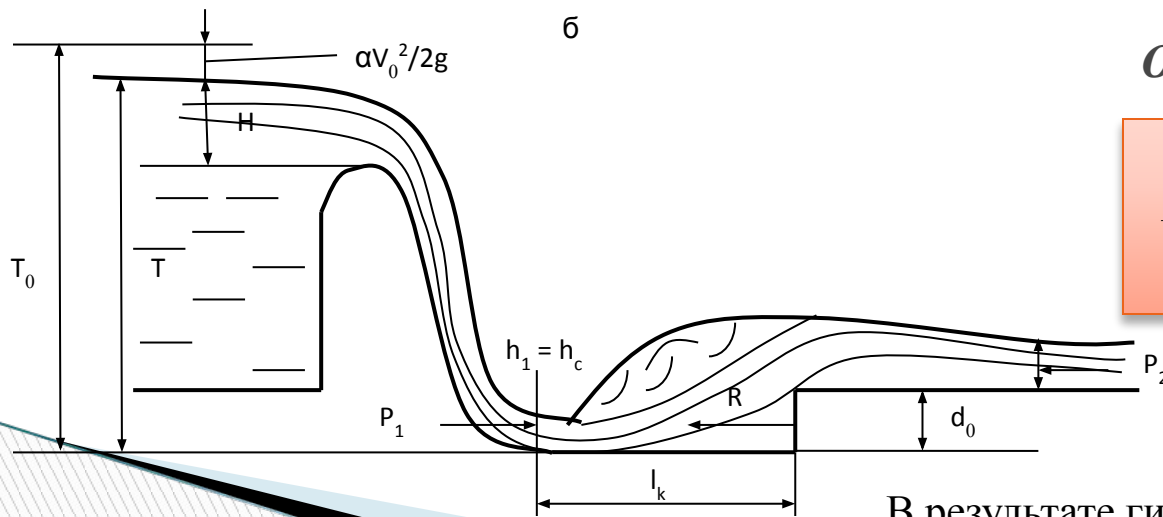
12-10-2010

Гидравлический расчет водобойного колодца



Основная формула для расчета:

$$T_{0C} = \sigma_3 \cdot h_2 + \frac{\alpha Q_p^2}{2g(B_{CT} \cdot \sigma_3 \cdot h_2)^2}$$



Основная формула для расчета:

$$R = \gamma \cdot h_{ЦВ} \cdot \omega_y = \gamma \left(h_2 - \frac{d_0}{2} \right) d_0$$

В результате гидравлических расчетов необходимо определить **глубину колодца d** и его **длину l_k**

Глубину водобойного колодца можно определить несколькими способами:

1) Принимают, что выход из водобойного колодца работает как затопленный водослив с широким порогом (рис. а).

Исходя из того, что колодец должен образовать глубину воды для затопления прыжка, в соответствии со схемой рис. а, глубину колодца можно определить по формуле

$$d = \sigma_3 h_2 - h_H - z$$

где: $\sigma_3 = 1,05 \dots 1,1$ – коэффициент затопления прыжка;

h_2 – вторая сопряженная глубина прыжка при расчетном расходе Q_p ;

h_H – глубина воды в нижнем бьефе при расходе Q_p ;

Z – гидравлический перепад, для определения которого используют формулу пропускной способности водослива с широким порогом, т.е.

$$z_0 = \frac{1}{2g} \left(\frac{Q_p}{\varphi_n B_K h_n} \right)^2$$

$$z = z_0 - \frac{\alpha Q_p^2}{2g(\sigma_3 h_2 B_K)^2}$$

где: $\varphi_n = 0,98 \dots 0,99$ – коэффициент скорости;

B_K – ширина водобойного колодца в плоскости вертикального уступа.

Т.к., при устройстве водобойного колодца потенциальная энергия потока верхнего бьефа увеличивается на величину d , то глубина потока в сечении С-С несколько уменьшится, а вторая сопряженная глубина прыжка немного увеличится. Поэтому необходимо выполнить уточнение глубины колодца. Для этого по следующей формуле уточняют глубину в сжатом сечении С-С:

$$h_{c1} = \frac{q}{\varphi_c \sqrt{2g(T_{01} - h_{c1})}}$$

Принимая, что $h_1 = h_{c1}$, по формуле сопряженных глубин определяют новое значение h_2 и рассчитывают глубину водобойного колодца во втором приближении. Как правило третьего приближения не выполняют.

2) Для определения глубины колодца, которая образует придвинутый к сечению С-С гидравлический прыжок, составим уравнение изменения количества движения в потоке между сечениями с глубинами h_C и h_H в проекциях на горизонтальную ось:

$$\alpha_0 \rho Q (V_2 - V_1) = P_1 - P_2 - R$$

где: R – реакция водобойного уступа, высота которого равна d_0 (рис. б);

P_1, P_2 – силы гидродинамического давления в сечениях 1-1, 2-2. Приняв, что P_1 и P_2 можно определить по законам гидростатики, т.е.:

$$P_1 = \rho g y_{c1} \omega_1 = \rho g \frac{h_C}{2} h_C B = \rho g \frac{h_C^2}{2} B$$

$$P_2 = \rho g y_{c2} \omega_2 = \rho g \frac{h_H}{2} h_H B = \rho g \frac{h_H^2}{2} B$$

Подставив значения и разделив все члены уравнения на $\rho g B$. Тогда получим

$$\frac{\alpha_0 Q^2}{g B^2} \left(\frac{1}{h_H} - \frac{1}{h_C} \right) = \frac{h_C^2}{2} - \frac{h_H^2}{2} - \frac{R}{\gamma}$$

Допустим, что корректирующий коэффициент количества движения α_0 равен корректирующему коэффициенту кинетической энергии α . Тогда выражение

$$\alpha_0 Q^2 / (g B^2) = h_K^3$$

где h_K – критическая глубина в прямоугольном русле.

Уравнение пишем в таком виде:

$$\frac{h_K^3}{h_C} + \frac{h_C^2}{2} = \frac{h_K^3}{h_H} + \frac{h_H^2}{2} + \frac{R}{\gamma}$$

Если длина колодца $l_K \geq l_C$ (где l_C – длина свободного совершенного прыжка), то реакцию R можно определить по гидростатическому закону. Тогда, принимая, что перед уступом d_0 глубина воды $h = h_2$, получим

$$R = \gamma \cdot h_{\text{цв}} \cdot \omega_V = \gamma \left(h_2 - \frac{d_0}{2} \right) d_0$$

где: $h_{\text{цв}}$ – глубина погружения геометрического центра площади сечения с глубиной h_2 .

Подставляя значение R в уравнение, получим

Параметр A равен:

$$d_0 = h_2 - \sqrt{h_2^2 - A}$$

$$A = (h_H - h_C) \cdot \left(\frac{2h_K^3}{h_C \cdot h_H} - h_H - h_C \right)$$

Для образования затопленного прыжка глубину d_0 необходимо увеличить. С учетом затопления прыжка глубину колодца рассчитывают по такой формуле:

$$d = \sigma_3 d_0 + (\sigma_3 - 1) \cdot h_H$$

где: $\sigma_3 = 1,05 \dots 1,1$ – коэффициент затопления прыжка;
 h_H – глубина воды в нижнем бьефе при расчетном расходе Q_p .

Длину колодца можно назначать в пределах:

$$l_K = \beta l_C = (0,8 \dots 1,0) l_C$$