

д) согласно зависимости (11-85)

$$Z_{\text{вс}} = 0,065 \cdot 2,70 = 0,18 \text{ м};$$

е) глубина на пороге

$$h_1 = h_n - Z_{\text{вс}} = 4,5 - 0,18 = 4,32 \text{ м};$$

ж) расход  $Q$  по формуле (11-83)

$$Q = 0,87 \cdot 6,0 \cdot 4,32 \sqrt{2 \cdot 9,8(5,0 - 4,32)} = 82,0 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Как видно, второе приближение дало изменение величины расхода на 2%. Отсюда ясно, что к третьему приближению обращаться нет надобности. Найденные во втором приближении величины  $h_1 = 4,3$  м и  $Q = 82,0$  м<sup>3</sup>/с можно считать окончательными.

Из приведенного примера видно, что учет перепада восстановления дал в данном частном случае существенное увеличение расхода (от 74,0 до 82,0 м<sup>3</sup>/с, т. е. примерно на 11%).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 11-1 Агасиева С. И. Боковые водосливы и траншейные водосбросы. — М.: Госстройиздат, 1956.
- 11-2 Вопросы мостовой гидравлики и гидрологии. — М.: Транспорт, 1967.
- 11-3 Избян С. В. Основы гидравлики. — М.: Госстройиздат, 1952.
- 11-4 Лебедев И. В. Основные положения гидравлического расчета строительной компоновки гидроузлов. — Труды МЭИ, № 1. — М.: изд. МЭИ, 1960.
- 11-5 Рекомендации по гидравлическому расчету водосливов Ч. I. Прямые водосливы II — 18 — 74. — Л.: Энергия, 1974.
- 11-6 Рекомендации по гидравлическому расчету водосливов Ч. II. Косые, боковые, криволинейные и кольцевые водосливы. II — 45 — 75. — Л.: Энергия, 1976.
- 11-7 Руднев С. С. Боковые водосливы. — М. — Л.: Госэнергоиздат, 1941.
- 11-8 Примеры гидравлических расчетов./Под ред. А. И. Богомолова. Изд. 2-е, пер. и доп. — М.: Транспорт, 1977.
- 11-9 Справочник по гидравлическим расчетам./Под ред. П. Г. Киселева. Изд. 4-е, пер. и доп. — М.: Энергия, 1972.
- 11-10 Технические условия и нормы проектирования гидротехнических сооружений. Гидравлические расчеты водосливов. ТУ 12—51. — Л. — М.: Госэнергоиздат, 1952.

## ГЛАВА ДВЕНАДЦАТАЯ

### СОПРЯЖЕНИЕ БЬЕФОВ ПРИ УСТРОЙСТВЕ ПЛОТИН

#### § 12-1. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ УКАЗАНИЯ

Необходимо различать следующие основные виды истечения воды при пропуске ее через плотину из верхнего бьефа в нижний:

- 1) истечение из-под затвора (шита)  $Z$  ( $Ш$ ), установленного на гребне  $G_p$  плотины, — рис. 12-1;
- 2) перелив через плотину (затвор полностью открыт) — рис. 12-2;
- 3) истечение через донное отверстие, образованное, например, поднимающимся затвором, — рис. 12-3.

Схемы на рис. 12-2 и 12-3 являются частными случаями схемы на рис. 12-1.

На рис. 12-1 и 12-3 показано истечение воды через напорное отверстие; на рис. 12-2 — через безнапорное отверстие, т. е. через водослив.

Дополнительно к уже известным обозначениям введем следующие:  $E$  — превышение горизонта воды верхнего бьефа над дном нижнего бьефа;  $E_0$  — то же, но с учетом скорости подхода  $v_0$ :

$$E_0 = E + \frac{\alpha v_0^2}{2g},$$

причем  $E_0$  есть полная удельная энергия воды верхнего бьефа относительно дна нижнего бьефа;  $h_c$  — так называемая сжатая глубина, т. е. толщина струи, выпадающей с плотины, измеряемая в «сжатом» сечении потока  $C-C$ , намеченном у подошвы плотины (рис. 12-1 и 12-2) или за затвором (рис. 12-3).

Сечение  $C-C$  характеризуется тем, что движение воды в районе его является плавно изменяющимся.

Сжатое сечение  $C-C$  не следует смешивать с верхним сжатым сечением  $C'-C'$  (рис. 12-1), расположенным непосредственно за затвором, установленным на гребне плотины.

Глубину воды, которая устанавливается в нижнем бьефе в естественном его состоянии (при пропуске заданного расхода), будем обозначать, как и в гл. II, через  $h_n$ .

При расчете сопряжения бьефов обычно пользуются графиком связи  $h_n = f(Q_{НБ})$ , построенным на основании гидromетрических данных (рис. 12-4):

по этому графику в зависимости от величины расхода воды в нижнем бьефе  $Q_{НБ}$  и устанавливают глубину  $h_n$ .

Для расчета сопряжения бьефов часто бывают заданными:

- 1) отметка горизонта воды верхнего бьефа ( $\nabla_{ГВБ}$ );
- 2) размеры отверстий плотины; их расположение в теле плотины; отметки порогов этих отверстий (см., например, рис. 11-31);
- 3) упомянутая выше кривая связи  $\nabla_{ГНБ} = f(Q_{НБ})$ ;
- 4) величины расходов

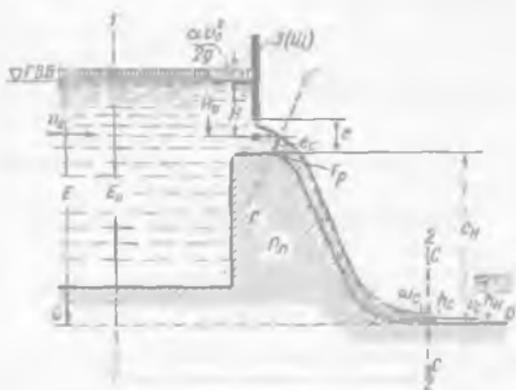


Рис. 12-1. Общий случай сопряжения бьефов Плотина с затвором

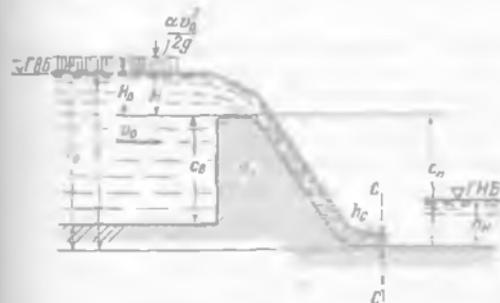


Рис. 12-2 Частный случай сопряжения бьефов. Плотина без затвора

<sup>1</sup> Практически по вертикальной оси графика на рис. 12-4 откладывают не глубины  $h_n$ , а отметки горизонта воды нижнего бьефа  $\nabla_{ГНБ}$  в естественном состоянии водотока.

воды, сбрасываемых в нижний бьеф через соседние сооружения (например, гидростанцию и т. п.),

5) отметка дна нижнего бьефа

Основные задачи, которые возникают при проектировании нижнего бьефа плотины, состоят:

а) в выяснении формы свободной поверхности потока, при помощи которой поверхность ниспадающей с плотины струи (или струи, выходящей, например, из донного отверстия) сопрягается с горизонтом воды нижнего бьефа. Здесь приходится выяснять также и ряд других условий протекания воды в пределах сооружения и за ним;



Рис. 12-3. Частный случай сопряжения бьефов. Истечение из-под затвора (из-под щита)



Рис. 12-4. Кривая связи  $h_n = f(Q_{нб})$

б) в установлении сил воздействия потока на различные бетонные и прочие части сооружения, устраиваемые в нижнем бьефе (для укрепления русла, регулирования потока и гашения его энергии, см. ниже);

в) в определении размывающей способности потока за сооружением.

Все эти сложные вопросы приходится выяснять для различных открытий затворов плотины, которые могут иметь место в период ее эксплуатации. Поскольку, изменяя величину открытия затворов, мы при этом изменяем также и величину расхода, сбрасываемого в нижний бьеф, то, следовательно, различным открытиям затворов будут соответствовать разные расчетные глубины  $h_n$  воды в нижнем бьефе.

В связи с тем, что ширина русла в нижнем бьефе обычно больше ширины водосбросного фронта плотины, в нижнем бьефе ее, как правило, получаем пространственную картину движения воды. Здесь могут возникать гидравлические прыжки пространственного характера (так называемые косые гидравлические прыжки). При определенных условиях может возникнуть так называемая сбойность потока (установившаяся или неустановившаяся), характеризуемая увеличением удельного расхода  $q$  (по течению) вдоль какой-либо прямолинейной или искривленной (в плане) «осевой линии» транзитной струи (см. далее рис. 14-13).

В случае плотин большой высоты, когда нам приходится сталкиваться с очень большими скоростями (доходящими, например, до 40–50 м/с), дополнительно происходит сильная аэрация потока, причем на определенных участках нижнего бьефа сооружения движется не вода, а водовоздушная смесь. При указанных скоростях за различными даже небольшими бетонными выступами (в частности за выступами шероховатости стенок русла) может возникать кавитация потока, которая порождает кавитационную эрозию сооружения (см. § 1-5) и т. п.

Перечисленные обстоятельства, связанные с проектированием пропуска воды через плотину, сплошь и рядом не представляется возможным выяснять

с достаточной точностью путем соответствующих теоретических расчетов. Поэтому при проектировании ответственных сооружений приходится обращаться к постановке опытов, проводимых в специальных гидравлических лабораториях.

Ниже мы не будем касаться всего комплекса названных выше вопросов, возникающих при проектировании устройств нижнего бьефа плотины. Далее осветим только основы теории сопряжения бьефов, ограничившись в основном так называемой плоской задачей, причем вовсе не будем затрагивать вопросов, отмеченных выше в пп «б» и «в», а также вопросов сбойности, аэрации, кавитации, косых волн, косых и пространственных прыжков.<sup>1</sup>

Вначале будем рассматривать только схемы, представленные на рис 12-1 и 12-2; схему на рис. 12-3, имеющую некоторые отличительные особенности, рассмотрим отдельно в последнем параграфе данной главы.

При проектировании плотины приходится решать, в частности, две следующие гидравлические задачи (которые не следует смешивать)

1-я задача. Расчет размеров водосливно-го фронта плотины. Эту задачу решают, исходя из необходимости пропуска через плотину (и другие расположенные при ней гидротехнические сооружения) расхода воды определенной обеспеченности, устанавливаемой соответствующими нормами (например, максимального расхода воды, повторяющегося один раз в 10000 лет и т. п.);

2-я задача. Расчет сопряжения бьефов. Эта задача обычно решается в следующем предположении: считаем, что горизонт воды в верхнем бьефе плотины задан (например, задан самый высокий возможный горизонт воды); дополнительно задан расход воды, пропускаемой в нижний бьеф через сооружение с плотиной (например, через гидростанцию и т. п.) Для этих условий рассматриваются различные варианты открытия отверстий плотины, причем для каждого такого варианта, пользуясь известными уже методами, рассчитывается картина сопряжения струи воды, пропускаемой через плотину, с нижним бьефом. Среди этих вариантов выбирается наиболее опасный, применительно к которому и проектируется конструкция плотины и так называемые устройства нижнего бьефа. В результате анализа упомянутых вариантов иногда выработывают *эксплуатационный график маневрирования затворами* плотины («диспетчерский график»), который не должен допускать особенно опасных открытий отверстий плотины (обуславливающих особенно тяжелые для работы конструкций условия сопряжения бьефов). Разумеется, при проектировании плотины такой график на основании теоретических расчетов, а иногда и на основании лабораторных опытов, составляется только вчерне. Из рассмотрения этого ориентировочного графика и получаем условия (величину открытия отдельных отверстий, расход воды в нижнем бьефе), на которые окончательно должно рассчитываться сопряжение бьефов. В дальнейшем данный ориентировочный график обычно уточняется после постройки плотины на основании натурных наблюдений.

Все эти вопросы, касающиеся постановки 1-й и 2-й гидравлических задач, связанных с проектированием плотин, изучаются в курсе «Гидротехнические сооружения».

## 12-2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛУБИНЫ В СЖАТОМ СЕЧЕНИИ

Первое, с чем приходится сталкиваться при расчете сопряжения бьефов, это вопрос о величине глубины  $h_c$  в сжатом сечении — так называемой сжатой глубины (рис. 12-1 и 12-2). Если бы сливная грань плотины имела малый уклон и была прямолинейной, то величину  $h_c$  легко можно было бы определить, пользуясь уравнением неравномерного движения (соединяя этим уравнением сечение

<sup>1</sup> Эти вопросы, как и некоторые другие, касающиеся расчета нижнего бьефа плотины, изучаются в специальных курсах (курсе «Гидротехнические сооружения» и др.). Только некоторые краткие сведения о косых прыжках и косых волнах нами будут приведены в гл. 15.

$C'-C'$ , где глубина известна, с сечением  $C-C$  (рис. 12-1). Однако сливная грань плотины обычно имеет большие уклоны и к тому же является криволинейной. В связи с этим величину  $h_c$  приходится рассчитывать, исходя непосредственно из уравнения Бернулли.

Намечаем плоскость сравнения  $OO$  на уровне дна нижнего бьефа (рис. 12-1). Сечение  $1-1$  берем перед плотиной, где движение воды еще плавно изменяющееся; сечение  $2-2$  проводим по линии  $C-C$ . Потерю напора  $h_f$  от сечения  $1-1$  до сечения  $2-2$  выражаем известной формулой

$$h_f = \zeta \frac{v_c^2}{2g}, \quad (12-1)$$

где  $v_c$  — средняя скорость в сжатом сечении;  $\zeta$  — соответствующий коэффициент сопротивления.

Соединяя уравнением Бернулли сечения  $1-1$  и  $2-2$ , получаем

$$v_c = \frac{1}{\sqrt{1+\zeta}} \sqrt{2g(E_0 - h_c)}. \quad (12-2)$$

Вводим обозначение

$$\frac{1}{\sqrt{1+\zeta}} = \varphi_c, \quad (12-3)$$

где  $\varphi_c$  — коэффициент скорости, учитывающий потери напора в пределах сооружения (на участке потока от сечения  $1-1$  до сжатого сечения  $C-C$ ).

Подставляя (12-3) в (12-2), окончательно получаем

$$(I) \quad v_c = \varphi_c \sqrt{2g(E_0 - h_c)} \quad (12-4)$$

Дополнительно можем написать

$$(II) \quad v_c = \frac{Q}{\omega_c}, \quad (12-5)$$

где  $\omega_c$  — площадь сжатого сечения,

$$\omega_c = f(h_c) \quad (12-6)$$

Уравнения (I) и (II) представляют собой систему двух уравнений с двумя неизвестными:  $h_c$  и  $v_c$ . Решая эту систему, находим величину  $h_c$ .

Система уравнений (I) и (II) может быть использована для определения  $h_c$  в случае любой плотины с затвором или без него (рис. 12-2). Эта система получена для русла нижнего бьефа любого поперечного сечения. Для трапециевидного русла и особенно для прямоугольного русла нижнего бьефа расчет по уравнениям (I) и (II) упрощается.

1. Трапециевидное русло нижнего бьефа. В этом случае<sup>1</sup>

$$\omega_c = h_c(b + mh_c), \quad (12-7)$$

где  $m$  — коэффициент откоса русла;  $b$  — ширина его по дну

Поэтому вместо уравнений (I) и (II) можем написать одно расчетное уравнение

$$Q = \varphi_c h_c (b + mh_c) \sqrt{2g(E_0 - h_c)}. \quad (12-8)$$

Это уравнение приходится решать в отношении  $h_c$  путем подбора.

В литературе имеется специальный расчетный график, построенный А. Н. Рахмановым в соответствии с уравнением (12-8). По этому графику значение  $h_c$  определяется достаточно просто.

<sup>1</sup> Предполагается, что в сжатом сечении водоворотные области отсутствуют.

2. Прямоугольное русло нижнего бьефа (плоская задача). В этом случае

$$Q = qb; \omega_c = bh_c; \quad (12-9)$$

поэтому вместо уравнения (II) получаем:

$$v_c = \frac{q}{h_c}. \quad (12-10)$$

Подставляя (12-10) в (12-4), имеем:

$$\frac{q}{h_c} = \varphi_c \sqrt{2g(E_0 - h_c)} \quad (12-11)$$

или<sup>1</sup>

$$E_0 = h_c + \frac{q^2}{2gh_c^2\varphi_c^2} \quad (12-12)$$

Уравнением (12-12) и пользуемся для определения  $h_c$  в случае прямоугольного отводящего русла, причем это уравнение приходится решать подбором.

Уравнение (12-12) является кубическим (в отношении  $h_c$ ) и потому имеет три корня: один — отрицательный, второй — удовлетворяющий условию  $0 < h_c < h_{*}$ , третий — характеризуемый условием  $h_c > h_{*}$ , где  $h_{*}$  — критическая глубина.

Следует запомнить, что в действительности  $h_c$  должно удовлетворять условию<sup>2</sup>

$$0 < h_c < h_{*}. \quad (12-13)$$

а следовательно, решая подбором уравнение (12-12), мы должны интересоваться вторым из названных выше корней этого уравнения.

При больших  $E_0$  слагаемым  $h_c$  в уравнении (12-12) можно пренебречь и вместо (12-12) написать весьма простое расчетное уравнение:

$$h_c = \frac{q}{v_c} = \frac{q}{\varphi_c \sqrt{2gE_0}}; \quad (12-14)$$

этим уравнением следует пользоваться, когда

$$\frac{E_0}{h_c} \geq 5; \quad (12-15)$$

при этом ошибка в величине  $h_c$  не будет превосходить 5%.

Для упрощения расчетов, относящихся к прямоугольному отводящему руслу, обычно встречающемуся в практике, в литературе приводятся специальные расчетные графики, служащие для определения  $h_c$ . Поясним один из таких графиков, построенный Н. Н. Павловским.

Как известно,

$$h_c^3 = \frac{\alpha q^2}{g} \approx \frac{q^2}{g}. \quad (12-16)$$

<sup>1</sup> Уравнение (12-12) легко запомнить, представив его в виде

$$E_0 = h_c + \frac{v_c^2}{2g} \frac{1}{\varphi_c^2}. \quad (12-17)$$

Как видно, в правой части (12-17) имеем выражение, отличающееся от удельной энергии сечения  $\mathcal{E}$  (написанной для сечения C—C) только наличием множителя  $1/\varphi_c^2$ .

<sup>2</sup> Глубина воды на гребне плотины без затвора (рис. 12-2) близка к критической (глубине) (или меньше ее). При падении воды скорость ее движения увеличивается, а следовательно, толщина струи вдоль течения должна уменьшаться; отсюда видно, что  $h_c$  всегда должна быть меньше  $h_{*}$ .

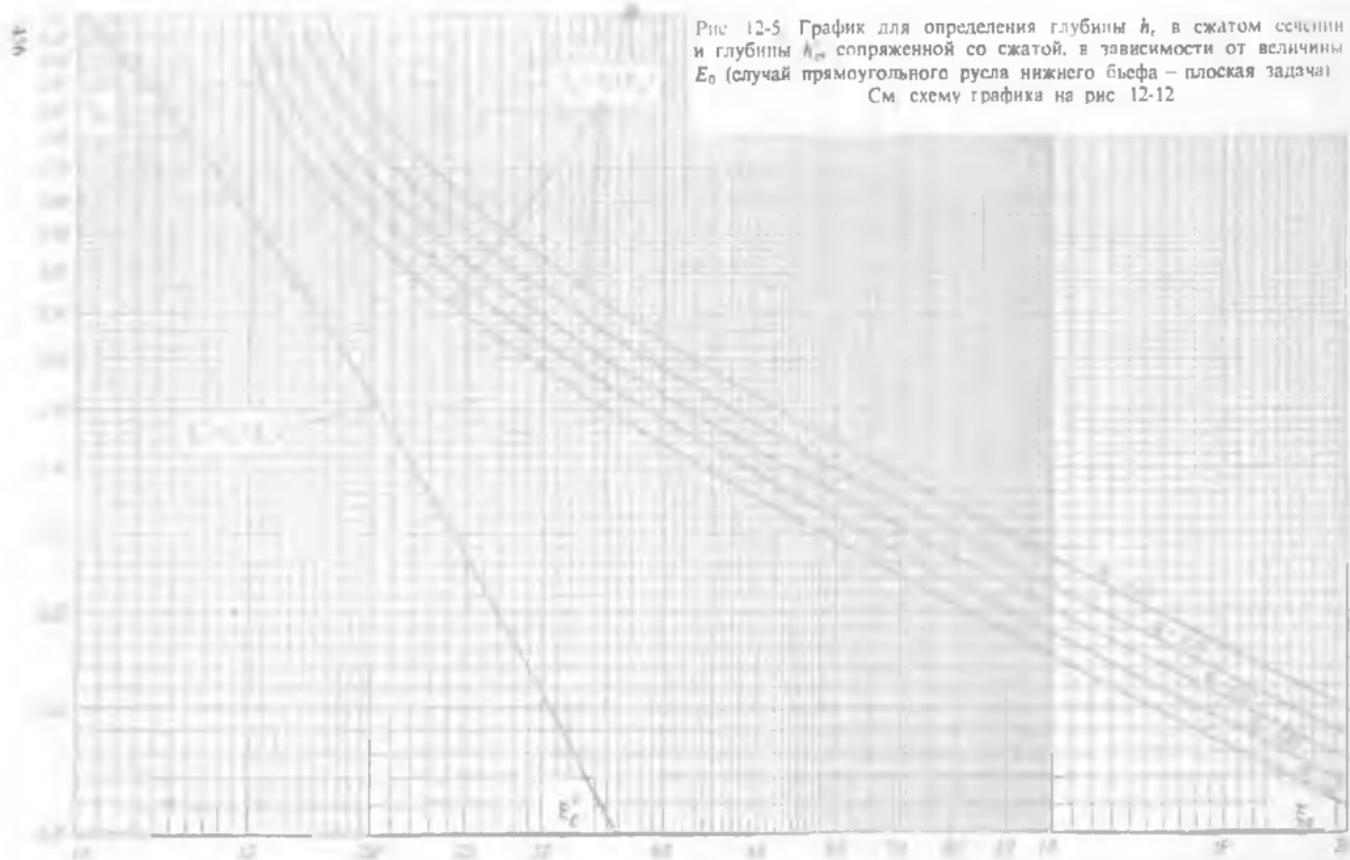


Рис 12-5 График для определения глубины  $h$ , в сжатом сечении и глубины  $h_c$ , сопряженной со сжатой, в зависимости от величины  $E_0$  (случай прямоугольного русла нижнего бьефа – плоская задача)  
См. схему графика на рис 12-12

Разделив на  $h_x$  уравнение (12-12) и учтя соотношение (12-16), получаем:

$$\xi_0 = \xi_c + \frac{1}{2\varphi_c^2 \xi_c^2} \quad (12-17)$$

где

$$\xi_0 = \frac{E_0}{h_x} \quad \text{и} \quad \xi_c = \frac{h_c}{h_x} \quad (12-18)$$

По уравнению (12-17) был построен график на рис. 12-5 (см. кривые этого графика для  $\varphi_c = 0,80; 0,85; 0,90; 0,95; 1,00$ ; см. также схему этого графика на рис. 12-12).

Имея такой график, величину  $h_c$  легко найти без подбора:

- 1) определяем  $h_x$ ;
- 2) определяем  $\xi_0 = E_0/h_x$ ;
- 3) устанавливаем  $\varphi_c$ ;
- 4) по графику находим  $\xi_c$ ;
- 5) наконец, определяем  $h_c$ ;

$$h_c = \xi_c h_x$$

Численные значения коэффициента  $\varphi_c$ , входящего в уравнения (12-4), (12-8) и (12-12), можно рекомендовать следующие:

- 1)  $\varphi_c = 0,85 \div 0,95$  — для случая на рис. 12-1;
- 2)  $\varphi_c = 0,90 \div 0,98$  — для случая на рис. 12-2;
- 3)  $\varphi_c = 0,80 \div 0,90$  — для случая водосливной стенки неплавного очертания

Для высоких плотин следует принимать меньшее из указанных значений  $\varphi_c$ .

Здесь приходится различать два случая:

- 1) когда уклон дна нижнего бьефа  $i > i_x$  (что редко встречается в практике);
- 2) когда уклон дна нижнего бьефа  $i < i_x$  (с чем обычно сталкиваемся в практике).



Рис. 12-6 Сопряжение бьефов при бурном движении воды в нижнем бьефе

В первом случае ( $i > i_x$ ) картину сопряжения бьефов получаем в виде, представленном на рис. 12-6. Если  $h_c < h_n$ , то в нижнем бьефе получаем кривую подпора типа  $c_{II}$  (как и показано на чертеже); если  $h_c > h_n$ , то получаем кривую спада  $b_{II}$  (см. рис. 7-31). Напомним, что  $h_c$  всегда меньше  $h_x$ . Если нижний бьеф подперт, причем глубина воды в нижнем бьефе  $h_n > h_x$  (см. на чертеже глубину  $h_{н2}$ ), то в этом случае за плотиной может образоваться гидравлический прыжок.

Обратимся ко второму из указанных выше случаев ( $i < i_0$ )<sup>1</sup>, причем рассмотрим его подробно. Здесь различают следующие типы сопряжения струи с нижним бьефом.

**1-й тип.** Сопряжение бьефов при помощи отогнанного прыжка (рис. 12-7). Длина  $l$  (см. чертеж) называется длиной отгона прыжка. Она представляет собой длину кривой подпора типа  $c_1$  (или  $c_0$ , если  $i = 0$ ) между сечениями, глубина в которых равна  $h_c$  и  $h'$ ; здесь глубина  $h'$  является глубиной, сопряженной с глубиной нижнего бьефа  $h_n$ .

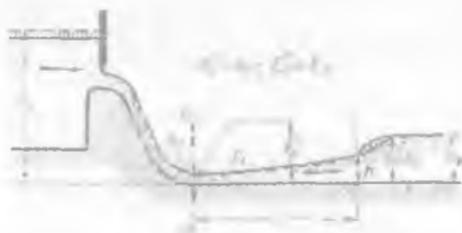


Рис. 12-7. Сопряжение бьефов при помощи отогнанного прыжка

**2-й тип.** Сопряжение бьефов при помощи затопленного прыжка (рис. 12-8). В этом случае вводят понятия степени затопления прыжка

$$A = \frac{h_n}{h_c}, \quad (12-19)$$

где  $h_c$  есть глубина, сопряженная со сжатой глубиной  $h_c$ . Величина  $A$  в данном случае должна быть больше единицы.

**3-й тип (промежуточный).** Прыжок в сжатом сечении (рис. 12-9). Для этого типа сопряжения величина  $A = 1,0$ .

При расчете сопряжения бьефов прежде всего необходимо установить, какой из трех названных типов сопряжения имеет место в рассматриваемом случае. При решении этой задачи поступают следующим образом (рис. 12-10).

Определив, как указано в § 12-2, сжатую глубину  $h_c$ , находят, пользуясь основным уравнением прыжка, глубину  $h_n'$ , сопряженную с глубиной  $h_c$ , при этом в сечении  $C-C$  представляют себе фиктивный воображаемый прыжок (см. на рис. 12-10 жирную штриховую линию).

Далее рассуждают так:

1) если нижний бьеф не затопливает фиктивный прыжок (см. уровень воды 1), т. е. если

$$h_n < h_c', \quad (12-20)$$

то имеем отогнанный прыжок (1-й тип сопряжения бьефов);

2) если нижний бьеф затопливает фиктивный прыжок (см. уровень воды 2), т. е.

$$h_n > h_c', \quad (12-21)$$

то имеем затопленный прыжок (2-й тип сопряжения бьефов):

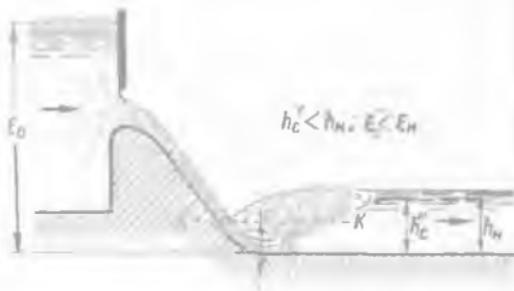


Рис. 12-8. Сопряжение бьефов при помощи затопленного прыжка

<sup>1</sup> Часто непосредственно за водосливной стенкой плотины уклон дна  $i = 0$

3) если горизонт нижнего бьефа оказывается на одном уровне с воображаемым горизонтом воды, определяемым глубиной  $h'_c$  (см. на чертеже — уровень воды 3), т. е. если

$$h_n = h'_c, \quad (12-22)$$

то фиктивный прыжок обращается в действительный, причем получаем 3-й тип сопряжения бьефов.

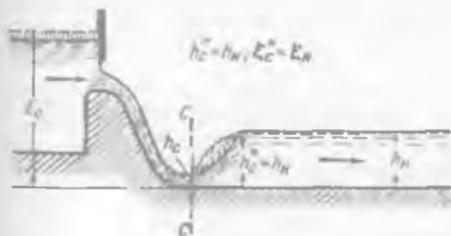


Рис. 12-9. Прыжок в сжатом сечении

Таким образом, тот или другой тип сопряжения бьефов получается в зависимости от соотношения глубин

$$h'_c \leq h_n \quad (12-23)$$

Как видно, при расчете сопряжения бьефов необходимо найти: а) сжатую глубину  $h_c$  (см. § 12-2) и б) глубину, сопряженную со сжатой  $h'_c$ . Кроме того, в случае 1-го типа сопряжения бьефов необходимо еще определить длину отгона прыжка.

Существуют три способа расчета сопряжения бьефов: общий аналитический; при помощи специальных графиков; приближенный (упрощенный).

1°. Аналитический способ. Этот способ заключается в следующем:

1) определяем по заданному напору  $H$  на гребне водослива расход  $Q$  (или, наоборот, по заданному  $Q$  находим  $H$ ); при этом пользуемся соответствующей «водосливной формулой» (при отсутствии затвора на гребне плотины) или формулой для расчета истечения воды из отверстия (при наличии затвора на гребне плотины);

2) зная  $H$ , вычисляем  $E$ , а затем и  $E_0$  (рис. 12-1 и 12-2);

3) по уравнению, приведенному в § 12-2, например (12-12), находим  $h_c$ ;

4) по основному уравнению прыжка (8-25) находим  $h'_c$  (глубину фиктивного прыжка);

5) сопоставляя величины  $h'_c$  и  $h_n$ , выясняем тип сопряжения бьефов;

6) если прыжок является отогнанным, находим длину отгона прыжка  $l$ , а также длину прыжка  $l_n$  и длину послепрыжкового участка  $l_{nn}$ ; при этом поступаем следующим образом:

а) зная глубину  $h_n$ , определяем по основному уравнению прыжка сопряженную с ней глубину  $h'$  (считая  $h_n = h''$ ; рис. 12-7);

б) по уравнению Бахметева вычисляем  $l$  как длину кривой свободной поверхности между сечениями, глубины в которых равны  $h_c$  и  $h'$ ;

в) длины  $l_n$  и  $l_{nn}$  устанавливаем, как было пояснено в гл. 8.

Если прыжок оказывается затопленным (рис. 12-8), определяем степень затопления прыжка  $A$  и длину послепрыжкового участка.<sup>1</sup>

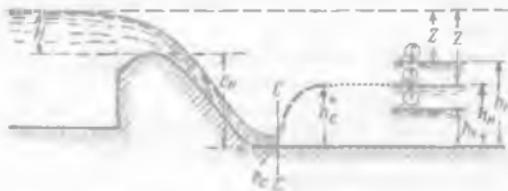


Рис. 12-10 Установление типа сопряжения бьефов по формулам (12-20) — (12-22)

<sup>1</sup> Расчеты, относящиеся к этому случаю, подробно поясняются в курсе «Гидротехнические сооружения».

2. Расчет при помощи графиков. Для упрощения расчета рядом авторов были предложены различные графики, по которым легко можно находить глубину  $h_c''$ .

Чтобы пояснить эти графики, разделим неравенства (12-23) на  $h_x$ ;<sup>1</sup> при этом вместо (12-23) получаем:

$$\frac{h_c''}{h_x} \leq \frac{h_{н1}}{h_x} \quad (12-24)$$

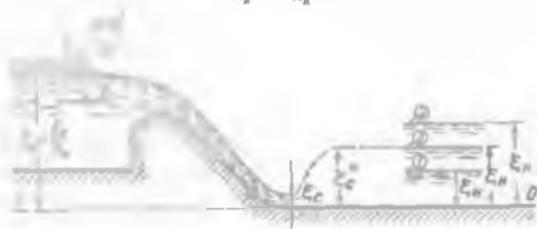


Рис 12-11 Установление типа сопряжения бьефов по формуле (12-26)

Обозначим

$$\frac{h_c''}{h_x} = \xi_c'', \quad \frac{h_{н1}}{h_x} = \xi_{н1} \quad (12-25)$$

где  $\xi_c''$  может быть названа относительной глубиной фиктивного прыжка и  $\xi_{н1}$  — относительной глубиной нижнего бьефа.

Пользуясь обозначениями (12-25), неравенства (12-24) можно переписать в виде

$$\xi_c'' \leq \xi_{н1} \quad (12-26)$$

при этом, как видно,

1) если относительная глубина фиктивного прыжка больше относительной глубины нижнего бьефа:

$$\xi_c'' > \xi_{н1} \quad (12-27)$$

то будет иметь место отогнанный прыжок,

2) если

$$\xi_c'' < \xi_{н1} \quad (12-28)$$

то получим затопленный прыжок,

3) если же

$$\xi_c'' = \xi_{н1} \quad (12-29)$$

то будем иметь прыжок в сжатом сечении.

Новый критерий сопряжения бьефов (12-26), даваемый вместо (12-23), можно дополнительно пояснить чертежом на рис. 12-11, который, в отличие от чертежа на рис. 12-10, представлен в относительных величинах.

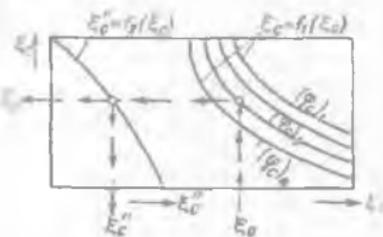


Рис 12-12 Схема для расчета сопряжения бьефов (по графику на рис. 12-5)

<sup>1</sup> Критическую глубину  $h_x$  ввел в зависимости служащие для приводимого ниже расчета сопряжения бьефов, А. А. Угличус

Из формулы (12-17) ясно, что величина  $\xi_c$  является функцией  $\xi_0$ :

$$\xi_c = f_1(\xi_0) \quad (12-30)$$

основное уравнение прыжка дает связь [см. (8-28)]:

$$\xi_c'' = f_2(\xi_c) \quad (12-31)$$

Сопоставляя (12-30) и (12-31), видим, что

$$\xi_c'' = f(\xi_0) \quad (12-32)$$

На рис. 12-5 совмещена кривая Угинчуса, построенная по зависимости (8-28), и кривые Павловского, построенные по зависимости (12-17) и (12-30)

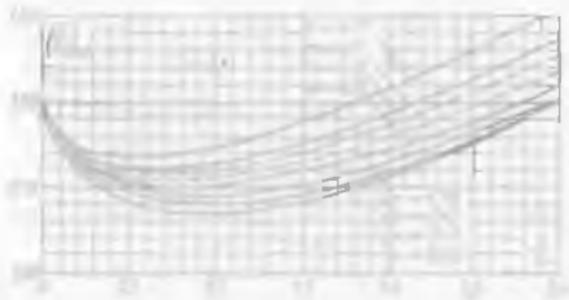


Рис. 12-13. График для определения критических значений  $(Z/c_{н\text{кр}})$  (плоская задача, водосливная стенка без затворов)

для различных  $\varphi_c$ . Пользуясь этим графиком, выполненным М. Д. Чертоусовым, можно в удобной форме выяснить вопрос о типе сопряжения бьефов,<sup>1</sup> имеюемся в данном конкретном случае. При этом поступаем следующим образом (см. схему графика на рис. 12-12) зная величину  $\xi_0$  и идя в направлении стрелок, указанных на чертеже, находим сразу  $\xi_c$  и  $\xi_c''$ , сопоставляя найденное по графику  $\xi_c''$  с величиной  $\xi_{н''}$ , устанавливаем форму сопряжения бьефов.

Длину отгона прыжка  $l$ , а также величины  $l_n$  и  $l_{np}$  в данном случае приходится рассчитывать, как указывалось в п. 1.

**3. Приближенный (упрощенный) способ расчета.** С этим способом расчета мы уже сталкивались при изучении водосливов. Согласно ему, если затворы на гребне плотины отсутствуют и если

$$\frac{Z}{c_n} > \left(\frac{Z}{c_n}\right)_{\text{кр}} \quad (12-33)$$

то имеем отогнанный прыжок [обозначения в формуле (12-33) см. на рис. 12-10]

Напомним, что критическое отношение перепада свободной поверхности  $Z$  на сооружении к высоте плотины  $c_n$ , измеренной в нижнем бьефе, часто равняется  $0,70 \div 0,75$ . Более точное значение  $(Z/c_n)_{\text{кр}}$  можно найти для водосливных стенок практического профиля по графику на рис. 12-13 в зависимости от коэффициента расхода водослива  $m$ .

<sup>1</sup> В литературе встречаются в другие графики и таблицы, служащие для определения  $h_c$  и  $h_c'$  (предложенные А. Н. Рахмановым, А. А. Угинчусом, Н. М. Бобным и др.).

Представим на рис. 12-14 случай сопряжения бьефов по типу отогнанного прыжка. В отличие от перепадов (см. гл. 13) плотины обычного профиля характеризуются тем, что струя, сходящая с гребня водослива, располагается на сливной поверхности плотины, причем сжатое сечение С-С устанавливается непосредственно у подошвы плотины. Надо подчеркнуть, что местоположение сжатого сечения С-С целиком определяется конструкцией плотины.

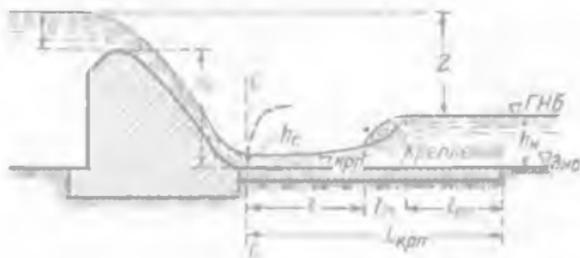


Рис. 12-14. К расчету длины крепления  $L_{крп}$  нижнего бьефа

В районе сжатого сечения С-С и правее его будем иметь относительно большие скорости, в связи с чем размывающая способность потока будет в этом месте велика. Имея это в виду, непосредственно за плотиной дно реки, если оно нескальное, придется покрывать креплением той или другой мощности.

Длина крепления  $L_{крп}$ , измеряемая от сечения С-С, в случае отогнанного прыжка определяется по формуле

$$L_{крп} = l + l_n + l_{пн} \quad (12-34)$$

где  $l$  — длина отгона прыжка;  $l_n$  — длина прыжка;  $l_{пн}$  — длина послепрыжкового участка.

Крепление нижнего бьефа в случае отогнанного прыжка получается длинным, а также имеющим большую толщину. Поэтому, руководствуясь экономическими соображениями, отогнанного прыжка за плотиной в случае нескального основания, как правило, не допускают и проектируют сопряжение бьефов по типу затопленного прыжка, принимая степень затопления прыжка  $A$  равной примерно  $1,10 \div 1,05$ .

Чтобы получить затопленный прыжок, приходится опускать (по отношению к естественной поверхности дна водотока) крепление нижнего бьефа, уменьшая при этом отметку его поверхности ( $V_{крп}$ ) на некоторую величину  $a$  (рис. 12-15).<sup>1</sup>

Как видно, в случае устройства такого «пониженного крепления», высота плотины, измеренная со стороны нижнего бьефа, увеличивается; увеличивается также так называемая затопляющая глубина: см. новую глубину нижнего бьефа непосредственно за плотиной

$$h'_н = h_n + a, \quad (12-35)$$

<sup>1</sup> Рисунок 12-15, так же как и ряд других чертежей этой главы (рис. 12-9, 12-16, 12-17 и др.) выподнен в искаженном масштабе (с преуменьшением горизонтальных размеров за сжатым сечением).

где  $h_n$  — действительная (естественная) глубина нижнего бьефа, отвечающая расходу воды в нижнем бьефе  $Q_{\text{НБ}}$ .

Длина крепления  $L'_{\text{крп}}$  при наличии затопленного прыжка оказывается равной

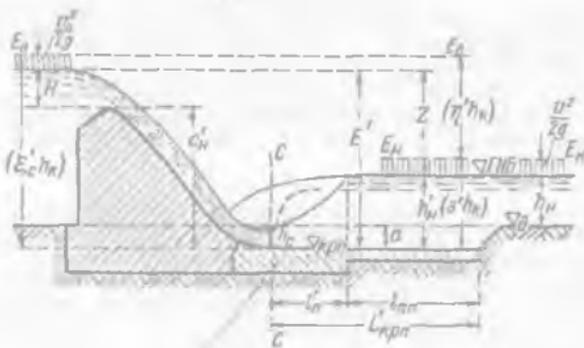
$$L'_{\text{крп}} = l'_n + l_{\text{крп}} \quad (12-36)$$

где  $l'_n$  — длина затопленного прыжка, равная, например, при относительно небольших величинах  $A$  (рис. 12-15):<sup>1</sup>

$$l'_n \approx 6(h'_n - h_n) \quad (12-37)$$

или

$$l'_n \approx (5.2 \div 5.5) h'_n \quad (12-38)$$



Пониженное крепление

Рис. 12-15. К расчету отметки пониженного крепления нижнего бьефа

Как отмечалось в § 12-1, глубину  $h_n$  устанавливаем по графику  $h_n = f(Q_{\text{НБ}})$  на рис. 12-4, зная расчетный расход нижнего бьефа  $Q_{\text{НБ}}$ . Этот расход

$$Q_{\text{НБ}} = Q + Q', \quad (12-39)$$

где  $Q$  — расход воды, сбрасываемой в нижний бьеф через проектируемую плотину, а  $Q'$  — через соседние сооружения.<sup>2</sup>

Расход  $Q$ , сбрасываемый через плотину, в зависимости от степени открытия затворов, вообще говоря, может изменяться от  $Q = 0$  до  $Q = Q_{\text{макс}}$ , где  $Q_{\text{макс}}$  получаем, когда все отверстия плотины открыты полностью, причем горизонт воды в верхнем бьефе находится на наиболее высоком уровне.

В качестве расчетного расхода  $Q_{\text{расч}}$ , сбрасываемого через плотину, т. е. расхода, на который должен вестись расчет сопряжения бьефов, следует принимать расход (из ряда возможных), отвечающий наиболее тяжелым усло-

<sup>1</sup> Эмпирические формулы (12-37) и (12-38) предлагались различными авторами (Сметаной, Эйнвахтером, Д. И. Куминым, М. Д. Чертоусовым и др.)

<sup>2</sup> В общем случае  $Q_{\text{НБ}}$  не равняется расходу воды, поступающей в верхний бьеф плотины (поскольку верхний бьеф плотины может выполняться или опорожняться). Соотношение расходов  $Q$  и  $Q'$  в формуле (12-39) может быть самым различным в зависимости от условий эксплуатации плотины.

вням сопряжения бьефов. Часто считают, что при  $Q_{\text{реч}}$  должны получать или наибольшую длину отгона прыжка или — при отсутствии отгона прыжка — наименьшую степень его затопления.

Каждому расходу  $Q$  отвечает своя глубина  $h_c$  нижнего бьефа. Чем больше расход, сбрасываемый через плотину, тем больше в неравенстве (12-23) глубина  $h_c'$ ; вместе с тем с увеличением расхода  $Q$  увеличивается в указанном неравенстве и  $h_{\text{н}}$  (см. также рис. 12-10). Непосредственные подсчеты показывают, что в связи с указанными обстоятельствами очень часто наиболее тяжелые условия сопряжения бьефов получаются не при максимальном расходе  $Q_{\text{макс}}$ . Обычно такие условия сопряжения бьефов имеют место при некотором промежуточном расходе  $Q_0$ :

$$0 < Q_0 < Q_{\text{макс}} \quad (12-40)$$

который получается: а) при наиболее высоком горизонте воды в верхнем бьефе, б) при минимально возможном значении  $Q'$  [см. формулу (12-39)], в) при некоторой заранее неизвестной степени открытости затворов.

Имея это в виду, расчетный расход  $Q_{\text{реч}} = Q_0$  при расчете сопряжения бьефов приходится в общем случае отыскивать путем целого ряда попыток: приходится рассматривать ряд различных схем открытости отверстий плотны (см. конец § 12-1).

#### § 12-5 ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ О ГАШЕНИИ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПОТОКА В НИЖНЕМ БЬЕФЕ СООРУЖЕНИЯ

Относительно большая потенциальная энергия воды верхнего бьефа непосредственно за плотинной частью переходит в кинетическую энергию, в связи с чем скорости движения воды в нижнем бьефе резко увеличиваются. Наличие

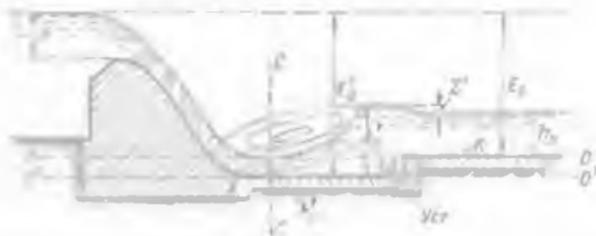


Рис. 12-16. Волобойный колодец

больших скоростей за плотинной заставляет, как отмечалось ранее, сооружать в нижнем бьефе плотины мощное, а следовательно, дорогостоящее крепление.

Для того чтобы уменьшить мощность этого крепления и снизить его стоимость, необходимо на возможно более короткой длине за плотинной:



Рис. 12-17. Волобойная стенка

а) преобразовать часть избыточной в нижнем бьефе избыточной кинетической энергии в потенциальную, доведя относительно малую глубину  $h_c$  до величины  $h_{\text{н}}$ ;

б) погасить оставшуюся часть избыточной кинетической энергии, т.е. рассеять ее (преобразовав в тепло за счет работы сил трения).

Гася за плотинной избыточную кинетическую энергию, вместо отогнанного гидравлического прыжка (рис. 12-14), получаем, как и в случае, показанном на рис. 12-15, затопленный прыжок, причем мощность крепления в нижнем бьефе снижается. Специальные устройства, сооружаемые в нижнем бьефе с целью гашения энергии, называются гасителями энергии.

Различают следующие типы гасителей энергии:

1) водобойный колодец (рис. 12-16). Как видно, идея водобойного колодца заключается в искусственном увеличении глубины нижнего бьефа за счет опускания дна русла нижнего бьефа непосредственно за плотинной на некоторую величину  $d$ . В гидравлическом отношении получаем здесь картину.



Рис. 12-18. Водобойный колодец комбинированного типа

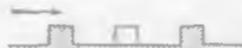


Рис. 12-19. Схема специальных гасителей энергии (пырсы или шашки)

аналогичную представленной на рис. 12-15. Схемы на рис. 12-15 и 12-16 отличаются друг от друга только следующим: в случае схемы на рис. 12-15 послепрыжковый участок длиной  $l_{пн}$  располагается в пределах сниженной части русла; кроме того, в этом случае отсутствуют бетонная стенка в виде уступа  $Ут$  и крепление русла  $K$  за стенкой, показанные на рис. 12-16;

2) водобойную стенку (рис. 12-17). Здесь затопляющая глубина  $h'_н$  больше глубины  $h_n$  на величину подпора  $Z'$ , вызываемого специальной водобойной стенкой  $Ст$ , устроенной в нижнем бьефе;

3) водобойный колодец комбинированного типа (рис. 12-18). В этом случае глубина нижнего бьефа увеличивается и за счет опускания дна русла нижнего бьефа, и за счет подпора, вызванного водобойной стенкой;

4) специальные гасители энергии. Идея этих гасителей заключается в том, что на пути потока устраиваются всевозможные препятствия, заставляющие его соответствующим образом деформироваться. В результате такой деформации потока происходит интенсивная диссипация (рассеивание) энергии. Примером специальных гасителей энергии являются пырсы или шашки, устраиваемые на поверхности дна русла нижнего бьефа (рис. 12-19).

В отличие от водобойных колодцев и водобойных стенок, специальные гасители не поддаются гидравлическому расчету. Размеры их, как правило, приходится назначать на основании опытов, проводимых в лаборатории с моделью проектируемого сооружения. Специальные гасители энергии изучаются в курсе «Гидротехнические сооружения». Ниже рассмотрим только водобойные колодцы и водобойные стенки, т. е. так называемые простейшие типы гасителей энергии. При этом поясним аналитический расчет колодцев и стенок, а также расчет их при помощи особых графиков, имеющих в литературе.<sup>1</sup>

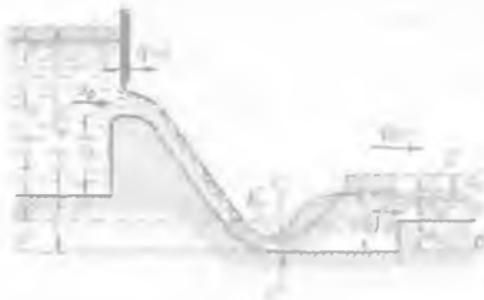
<sup>1</sup> Современный прием расчета водобойных колодцев и водобойных стенок был дан Н. М. Бобинным, который использовал некоторые предложения А. А. Угличуса, А. Н. Рахманова и др. (см. «Известия ВНИИГ», т. XIII 1934). Несколько позже данный вопрос в весьма четкой форме представил в своих работах Н. Н. Павловский. Затем М. Д. Чертоусов внес некоторые дополнительные частные предложения, касающиеся формы построения отдельных расчетных графиков.

§ 12-6. АНАЛИТИЧЕСКИЙ СПОСОБ РАСЧЕТА  
ГЛУБИНЫ ВОДОБОЙНОГО КОЛОДЕЦА  
И ОТМЕТКИ ПониЖЕННОГО КРЕПЛЕНИЯ ЗА ПЛОТИНОЙ

1. Общие указания. Идея устройства колодца (рис. 12-16) заключается в следующем: создавая колодец, понижаем дно русла нижнего бьефа у плотины от положения  $OO$  до положения  $O'O'$  на величину  $d$ , где  $d$  — глубина водобойного колодца.

В результате этого имеем следующее:

- а) полная высота падения струи увеличивается от  $E_0$  до  $E'_0$  (см. чертеж);
- б) сжатая глубина  $h_c$  уменьшается при этом до величины  $h'_c$ ;
- в) с уменьшением сжатой глубины сопряженная с ней глубина  $h''_c$  увеличивается и, следовательно, увеличивается высота прыжка  $(h''_c - h'_c)$ ;



г) с увеличением высоты прыжка резко увеличивается потеря энергии в нем (см. § 8-5, где указывалось, что потеря энергии в прыжке прямо пропорциональна высоте прыжка примерно в третьей степени).

Работу водобойного колодца можно пояснить еще и так: отогнанный прыжок (нежелательный тип сопряжения бьефов) получается в случае, когда

$$h''_c > h_n; \quad (12-41)$$

Рис. 12-20 К расчету теоретической глубины создавая колодец, мы при этом увеличиваем глубину  $h'_c$  (см. выше п. «в»); однако наряду

с этим мы еще больше увеличиваем глубину нижнего бьефа, измеряемую непосредственно за плотиной (см. глубину  $h''_c$  на рис. 12-16): в результате вместо (12-41) можем получить требуемое неравенство

$$h''_c < h_n. \quad (12-42)$$

Необходимая глубина колодца  $d$ , отвечающая затопленному прыжку со степенью затопления  $A = (1,05 \div 1,10)$ , находится по формуле

$$d = (1,05 \div 1,1) d_0 + (0,05 \div 0,10) h_n, \quad (12-43)$$

где  $d_0$  — так называемая теоретическая глубина колодца, т. е. такая глубина, при которой прыжок устанавливается в сжатом сечении и которая характеризуется степенью затопления  $A = 1,0$  (рис. 12-20). Величина  $d$  в формуле (12-43) может быть названа, в отличие от  $d_0$ , практической глубиной колодца.

Справедливость формулы (12-43) усматривается из следующего.

Степень затопления  $A$  прыжка в колодце с некоторым приближением можно представить в виде

$$A \approx \frac{h_n}{(h'_c)^2}$$

где глубины  $h_n$  и  $(h'_c)^2$  показаны соответственно на рис. 12-16 и на рис. 12-20.

Если пренебречь перепадами свободной поверхности  $Z'$ , указанными на этих чертежах, то вместо приведенного соотношения можем написать

$$A = \frac{d + h_n}{d_0 + h_n}$$

откуда получаем

$$d = Ad_0 + (A - 1)h_n,$$

что при  $A = 1,05 \div 1,10$  и дает нам формулу (12-43).

Для того чтобы по формуле (12-43) установить практическую глубину  $d$  водобойного колодца, т. е. глубину, которая должна быть окончательно принята в проекте сооружения, необходимо знать теоретическую глубину колодца  $d_0$ . Обратимся к определению глубины  $d_0$ .

2. Расчет теоретической глубины водобойного колодца. Знаком «прим» (') будем отмечать те размеры, которые изменили свою величину в связи с устройством колодца (рис. 12-20). Подчеркнем, что на рис. 12-20 представлена не та гидравлическая картина, которую стремимся получить, а некоторая расчетная гидравлическая схема, из рассмотрения которой находим вспомогательную величину  $d_0$ .

Рассматривая плоскую задачу, прежде всего находим расход  $Q$ , сбрасываемый в нижний бьеф, а также удельный расход для плотины

$$q_{пл} = \frac{Q}{B} \quad (12-44)$$

где  $B$  — ширина водосливного фронта плотины.

При отыскании  $Q$  пользуемся или соответствующей водосливной формулой, или расчетной зависимостью, относящейся к случаю истечения из отверстия. Зная  $q_{пл}$ , ведем расчет, придерживаясь следующей схемы.

1-й пункт расчета. Здесь выполняем следующие действия:

- 1) задаемся какой-либо величиной  $d_0$ ;
- 2) находим новое значение  $E_0$ :

$$E_0 = E_0 + d_0; \quad (12-45)$$

3) пользуясь  $E_0$ , находим новое значение  $h_c$ , т. е. величину  $h_c'$ ;

4) пользуясь  $h_c'$  находим новую, сопряженную глубину  $h_c''$ , т. е. глубину  $(h_c'')$ ;

5) в конце водобойного колодца имеем уступ  $ab$ , который может быть назван водобойным уступом; он работает, как водосливная стенка затопленного водослива с широким порогом; в связи с этим в районе уступа  $ab$  получается перепад свободной поверхности  $Z'$ .

Определив выше глубину  $(h_c'')$  и считая, что  $(h_c'') = h_n$ , находим теперь величину этого перепада (см. чертеж);

$$Z' = (h_c'') - d_0 - h_n; \quad (12-46)$$

6) находим скорость  $v_0'$  подхода к водобойному уступу:

$$v_0' = \frac{q_{пл}}{(h_c'')}; \quad (12-47)$$

7) вычисляем перепад на водобойном уступе с учетом скорости подхода  $v_0'$ :

$$Z_0' = Z' + \frac{\alpha (v_0')^2}{2g}; \quad (12-48)$$

8) наконец, по водосливной формуле, относящейся к затопленному водосливу с широким порогом, определяем удельный расход для водобойного уступа:

$$q_{уст} = \varphi_{уст} h_n \sqrt{2gZ_0'}, \quad (12-49)$$

где  $\varphi_{уст}$  — коэффициент скорости для уступа ( $\sim 0,95$ ).

2-й пункт расчета. Задаем другим значением величины  $d_0$  и, следуя схеме расчета, поясненной в 1-м пункте, определяем для этой величины  $d_0$  значение  $q_{уст}$  и т. д.

В результате такого расчета находим

$$q_{уст} = f(d_0); \quad (12-50)$$

эта зависимость в виде кривой показана на рис. 12-21.

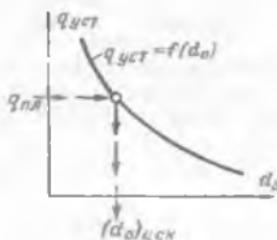


Рис. 12-21. Определение теоретической глубины колодца  $d_0$

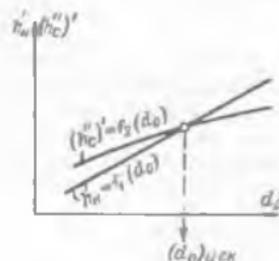


Рис. 12-22 Упрощенный способ определения теоретической глубины колодца  $d_0$

Ясно, что величина  $q_{уст}$  должна равняться  $q_{пл}$ :

$$q_{уст} = q_{пл} \quad (12-51)$$

Имея это в виду, по кривой на рис. 12-21 находим величину  $d_0$ , удовлетворяющую условию (12-51).

3. Дополнительные замечания. Определение отметки  $V_{впр}$  пониженного крепления (рис. 12-15).

1. В некоторых случаях можно пренебречь перепадом  $Z'$  на водобойном уступе (рис. 12-16) и считать, что горизонт воды в колодце будет стоять на одном уровне с горизонтом воды в нижнем бьефе; новая глубина  $h'_н$  в колодце, отвечающая величине  $d_0$ , в этом случае будет:

$$h'_н = h_n + d_0, \quad (12-52)$$

причем расчет глубины колодца значительно упрощается.

Для отыскания  $d_0$  достаточно построить график, представленный на рис. 12-22. По вертикальной оси графика откладываем величины, вычисленные по формуле (12-52), и получаем прямую  $h'_н = f_1(d_0)$ .

По этой же вертикальной оси откладываем глубины  $(h''_н)$ , вычисляемые, как указано выше, и получаем кривую

$$(h''_н)' = f_2(d_0). \quad (12-53)$$

Ясно, что искомая величина  $d_0$  будет отвечать точке пересечения прямой  $h'_н = f_1(d_0)$  и кривой  $(h''_н)' = f_2(d_0)$ . Этим аналитическим способом можно пользоваться при отыскании отметки поверхности пониженного крепления

$$V_{впр} = V_d - a = \nabla_{ГНБ} - h_n - a$$

в случае, представленном на рис. 12-15, где  $V_d$  — отметка поверхности дна

нижнего бьефа: размер  $a$ , показанный на этом чертеже, вычисляется по формуле (12-43) после замены в ней обозначений  $d$  и  $d_0$  соответственно обозначениями  $a$  и  $a_0$ . В формуле (12-52) обозначение  $d_0$  также надо заменить при этом расчете обозначением  $a_0$ , где  $a_0$  есть «теоретическое» заглубление крепления под уровнем дна нижнего бьефа (величина, аналогичная  $d_0$ ).

2. В зависимости от степени открытия затвора, имеющегося на гребне плотины, будем получать различные расходы  $Q$ , сбрасываемые в нижний бьеф. Наибольший расход  $Q$  будет иметь место при полном открытии отверстия плотины.

Следует подчеркнуть, что наибольшая глубина колодца, которая должна нас интересовать,<sup>1</sup> получается, в общем случае, не при максимальном расходе  $Q$ , а при некотором промежуточном значении расхода  $Q_{расч}$ , который приходится отыскивать путем ряда попыток. В связи с этим при расчете приходится строить график, представленный на рис. 12-23.

### § 12-7 РАСЧЕТ ГЛУБИНЫ ВОДОБОЙНОГО КОЛОДЦА И ОТМЕТКИ ПониЖЕННОГО КРЕПЛЕНИЯ ЗА ПЛОТИНОЙ ПРИ ПОМОЩИ ГРАФИКОВ

Существуют различные графики, служащие для расчета глубины водобойного колодца. Поясним здесь только график Н. Н. Павловского. С этой целью представим на рис. 12-24 чертеж водобойного колодца, причем на чертеже укажем относительные, а не абсолютные размеры.

$$\xi_0 = \frac{E_0}{h_u}; \quad \zeta_0 = \frac{E'_0}{h_u}; \quad \zeta_0 = \frac{Z' + \frac{\alpha (v'_0)^2}{2g}}{h_u} = \frac{Z'_0}{h_u}; \quad \xi_u = \frac{h_u}{h_u} \quad (12-54)$$

Через  $\eta'$  на рис. 12-24 обозначена потеря напора на сооружении, отнесенная, как и другие величины, к критической глубине ( $\eta'$  — «относительная потеря напора на сооружении»).

Из чертежа видно, что

$$\eta' = \xi_0 - \xi_u - \zeta_0. \quad (12-55)$$

где  $\xi_0$  и  $\xi_u$  легко можно найти, зная  $E_0$ ,  $h_u$  и  $h_u$ .

Величину полного относительного перепада  $\zeta_0$  на водобойном уступе, входящую в формулу (12-55), можно получить из «водосливной формулы», относящейся к затопленному водосливу с широким порогом. Эта формула приводится здесь к виду,<sup>2</sup>

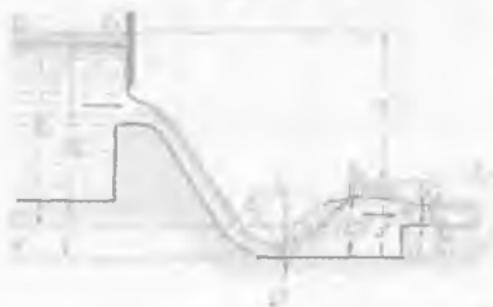


Рис. 12-24. К расчету глубины водобойного колодца при помощи графика на рис. 12-25

<sup>1</sup> Именно такая глубина колодца должна быть окончательно принята в проект плотины.

<sup>2</sup> Действительно,  $q = \varphi_{11} h_u \sqrt{2gZ'_0}$ , откуда  $Z'_0 = \frac{q^2}{g} \frac{1}{2\varphi_{11}^2 h_u^3} = \frac{h_u^2}{2\varphi_{11}^2 h_u^3}$ , что и дает (12-56)

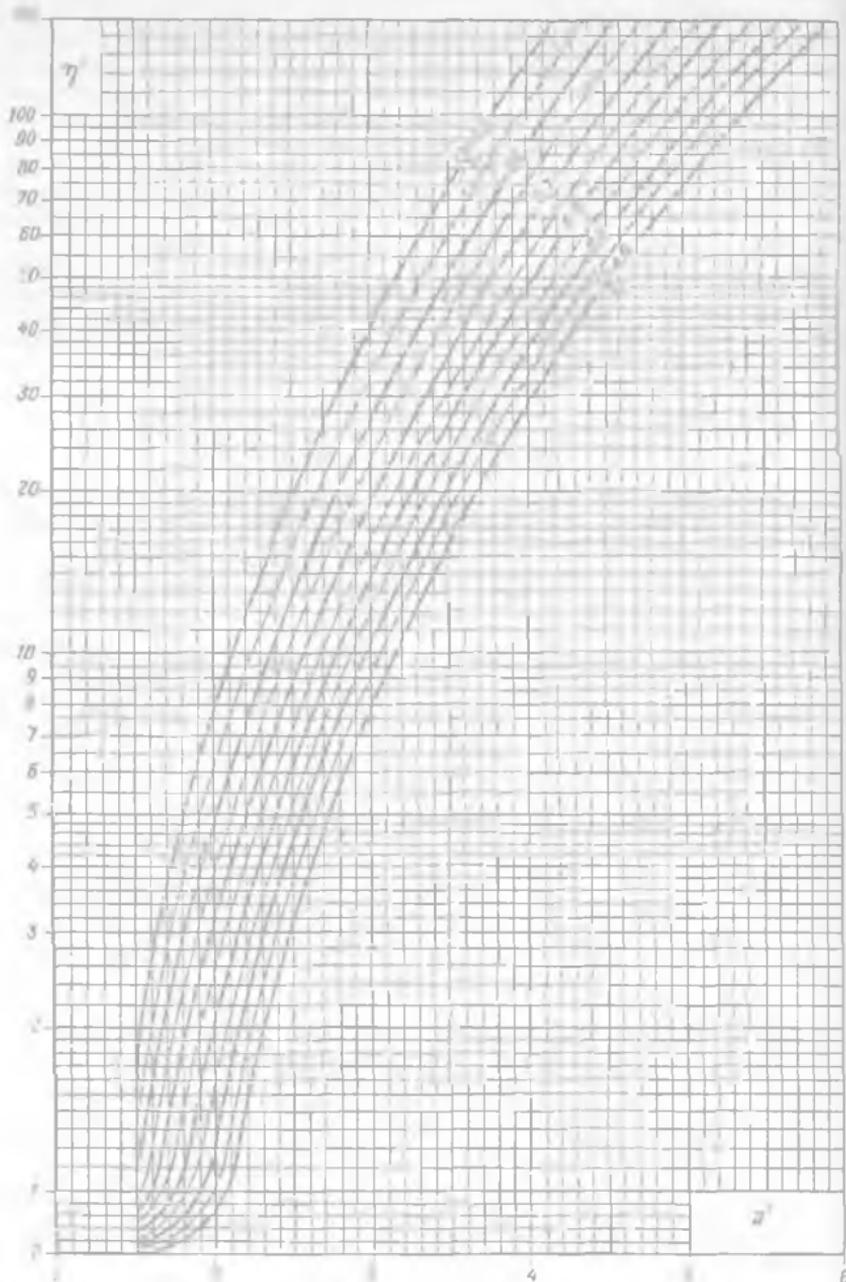


Рис. 12-25. График для расчета глубины водобойного колодца и отметки пониженного крепления за плотиной (плоская задача)

$$\xi_0 = \frac{Z_0}{h_n} = \frac{1}{2\varphi_{ст}^2 \xi_{ст}^2} \approx \frac{1}{2\xi_{ст}^2}, \quad (12-56)$$

где  $\varphi_{ст}$  — коэффициент скорости для водобойного уступа ( $\sim 1.0$ ).

Учитывая (12-56), зависимость (12-55) можно представить в виде

$$\eta' = \xi_0 - \xi_{ст} - \frac{1}{2\xi_{ст}^2}. \quad (12-57)$$

При заданных  $E$ ,  $Q$  и  $h_n$  по последней формуле находим величину  $\eta'$ , после чего обращаемся к графику на рис. 12-25.<sup>1</sup>

На этом графике через  $\varphi_c$  обозначен коэффициент скорости, учитывающий потери напора на сооружении (до сжатого сечения  $C-C$ ); численные значения  $\varphi_c$  даны на стр. 457.

Зная  $\eta'$ , по графику, приняв соответствующие значения  $\varphi_c$  (см § 12-2), находим величину  $\varepsilon'$ , указанную на рис. 12-24.

Определив  $\varepsilon'$ , находим  $d_r$  по формуле

$$d_0 = (\eta + \varepsilon - \xi_0) h_n = \left( \varepsilon - \xi_{ст} - \frac{1}{2\xi_{ст}^2} \right) h_n \quad (12-58)$$

Зная теоретическую глубину колодца  $d_0$ , практическую глубину колодца  $d$  определяем, как указано в п. 1 § 12-6.

Надо учитывать следующее: если  $\xi_0'$  есть относительное заглубление дна колодца под напорной линией  $E_n - E_n$  верхнего бьефа, то  $\varepsilon'$  есть относительное заглубление этого дна под напорной линией  $E_n - E_n$ , отвечающей нижнему бьефу.

Пользуясь поясненным графиком, легко также найти и отметку поверхности пониженного крепления нижнего бьефа (рис. 12-15). Здесь применяем те же зависимости (12-57), (12-58), (12-43), причем в двух последних формулах заменяем обозначения  $d_0$  и  $d$  соответственно обозначениями  $a_0$  и  $a$ .

## § 12-8 АНАЛИТИЧЕСКИЙ СПОСОБ РАСЧЕТА ВЫСОТЫ ВОДОБОЙНОЙ СТЕНКИ

1°. Общие указания. Представим на рис. 12-26 теоретический случай водобойной стенки, когда гидравлический прыжок находится в сжатом сечении. Через  $c_0$  обозначим теоретическую высоту водобойной стенки.

Видно, что водобойная стенка работает как водосливная стенка практического профиля; при этом получаем водослив:

- а) или подтопленный,
- б) или неподтопленный<sup>2</sup>

Удельный расход для водобойной стенки в общем случае определяется формулой<sup>3</sup>

$$q_{ст} = \sigma_n m \sqrt{2g (H_0)^{3/2}}, \quad (12-59)$$

где

$$H_0 = H' + \frac{\alpha (v_0')^2}{2g} \quad (12-60)$$

<sup>1</sup> Зависимостей, по которым построен данный график, здесь не приводим.

<sup>2</sup> Отогнанный прыжок за стенкой не допускается.

<sup>3</sup> Здесь всюду величины, относящиеся к водобойной стенке (напор. высота подтопления  $h_n$  и т. п.) отмечаем значком «прим» (').

$$\sigma_n = f\left(\frac{h_n^*}{H_0}\right). \quad (12-61)$$

Расчет водобойной стенки проще, чем расчет водобойного колодца, поскольку в случае колодца с изменением  $d_0$  изменялись величины  $h_x$  и  $h_c^*$ ; в случае же стенки с изменением  $c_0$  величины  $h_c$  и  $h_c^*$  при заданном  $E_0$  ( $E_0 = \text{const}$ ) не должны изменяться. Найдя теоретическую высоту стенки  $c_0$ ,

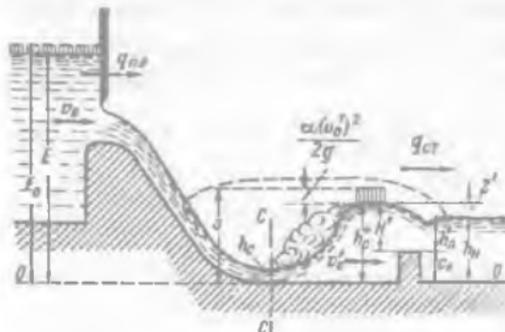


Рис. 12-26. К расчету теоретической высоты  $c_0$  водобойной стенки

необходимо установить практическую высоту стенки  $c$ , обеспечивающую затопление прыжка (см свободную поверхность на рис 12-26, показанную штриховой линией).

Практическая высота стенки  $c$  может быть определена по формуле

$$c = c_0 + (0,05 \div 0,10) h_c^*. \quad (12-62)$$

Действительно,

$$A = \frac{h_n^*}{h_c^*} = \frac{c + H}{h_c^*} = \frac{c + (h_n^* - c_0)}{h_c^*}$$

где  $h_n^*$  показано на рис 12-17 и  $h_c^*$  — на рис 12-26

Из этой зависимости получаем

$$Ah_c^* = c + h_c^* - c_0 \quad \text{и} \quad c = c_0 + (A - 1) h_c^*,$$

что при  $A = 1,05 - 1,10$  и дает (12-62).

Остановимся на определении величины  $c_0$ , причем рассмотрим два случая: когда стенка образует неподтопленный водослив и когда она образует подтопленный водослив.

2°. Определение  $c_0$ , когда водобойная стенка образует неподтопленным водослив. В этом случае  $c_0$  находится без подбора. Ход решения задачи здесь следующий:

1) зная  $E$  и установив удельный расход для плотины  $q_{пл} = (Q : B)$ , определяем величину  $h_c$  (см § 12-2);

2) пользуясь основным уравнением прыжка, находим глубину  $h_c^*$ , сопряженную с глубиной  $h_c$ ;

3) определяем скорость подхода  $v_0^*$  для водобойной стенки:

$$v_0^* = \frac{q}{h_c^*}, \quad (12-63)$$

причем устанавливаем величину скоростного напора  $\frac{\alpha(v_0^*)^2}{2g}$ ,

4) полагая в формуле (12-59)  $q_{ст} = q_{пл}$  и  $\sigma_n = 1,0$ , находим, исходя из этой формулы,  $H_0^*$ :

$$H_0^* = \left( \frac{q_{пл}}{m' \sqrt{2g}} \right)^{2/3}, \quad (12-64)$$

коэффициент расхода для водобойной стенки может быть принят равным, например,

$$m' \approx 0,40 \div 0,44 \approx 0,42;$$

5) зная полный напор на водобойной стенке  $H_0$ , определяем геометрический напор на водобойной стенке:

$$H' = H_0 - \frac{\alpha (v_0)^2}{2g} \quad (12-65)$$

6) наконец, устанавливаем величину  $c_0$  (см. чертеж):

$$c_0 = h_c'' - H. \quad (12-66)$$

3°. Определение  $c_0$ , когда водобойная стенка образует подтопленный водослив. Здесь величину  $c_0$  приходится находить путем подбора

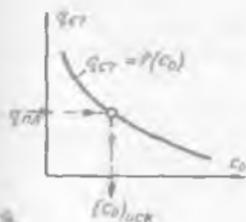


Рис. 12-27. Определение теоретической высоты стенки  $c_0$



Рис. 12-28. Сопряжение бьефов за водобойной стенкой

Сперва определяем, как это было пояснено в п. 2, величины:

$$q_{пл}, h_c, h_c', v_0, \frac{\alpha (v_0)^2}{2g} = h_c'. \quad (12-67)$$

Далее придерживаемся следующей схемы расчета.

1. Задаемся некоторым значением  $c_0 = c_0'$  и вычисляем величины:

$$а) H' = h_c - c_0'; \quad (12-68)$$

$$б) H_0' = H' + \frac{\alpha (v_0)^2}{2g}; \quad (12-69)$$

$$в) h_0' = h_n - c_0'; \quad (12-70)$$

г)  $\sigma_n$ , причем эту величину находим по графику на рис. 11-32 в зависимости от предварительно установленного отношения ( $h_0' : H_0'$ );<sup>1</sup>

д) удельный расход для стенки  $q_{ст} = q_{ст}'$  [по формуле (12-59)].

2. Задаемся другим значением  $c_0 = c_0''$  и вычисляем, исходя из этого значения  $c_0$ , те же величины, что и в п. 1, в частности величину  $q_{ст}$ , обозначаемую в данном случае через  $q_{ст}''$  и т. д.

В результате такого рода подсчетов строим график, показанный на рис. 12-27:

$$q_{ст} = f(c_0). \quad (12-71)$$

Поскольку удельный расход для стенки  $q_{ст}$  должен равняться удельному расходу для плотины  $q_{пл}$ :

<sup>1</sup> Иногда значения  $\sigma_n$ , найденные по этому графику, рекомендуют в запас несколько увеличивать.

$$q_{ст} = q_{пл} \quad (12-72)$$

то искомую величину ( $c_0$ )<sub>иск</sub> находим, как показано на рис. 12-27.

4°. Заключительные замечания. 1. Часто заранее неизвестно, будет ли водослив образованной водобойной стенкой, работать как подтопленный или как неподтопленный.

В таком случае поступают следующим образом: сначала рассчитывают стенку в предположении, что она образует неподтопленный водослив; затем проверяют, исходя из известных критериев, действительно ли в данном случае имеем неподтопленный водослив. Если оказывается, что стенка образует подтопленный водослив, то снова повторяют расчет этой стенки, учитывая подтопление.

2. Высоту водобойной стенки  $c_0$ , так же как и глубину водобойного колодца  $d_0$  приходится определять для различных величин открытия затвора на плотине. При этом из ряда полученных значений  $c_0$  окончательно выбираем наибольшее.

3. При расчете водобойной стенки всегда следует выяснить условия сопряжения бьефов за ней. В некоторых случаях за стенкой может получиться отогнанный прыжок (рис. 12-28, а). При этом за данной стенкой приходится устраивать вторую водобойную стенку (меньшей высоты). Иногда же за второй стенкой приходится делать третью стенку (рис. 12-28, б) и т. д.

Высота каждой дополнительной стенки находится так же, как и высота первой; при расчете дополнительной стенки стенку, расположенную выше по течению, рассматриваем как плотину.

#### § 12-9. РАСЧЕТ ВЫСОТЫ ВОДОБОЙНОЙ СТЕНКИ ПРИ ПОМОЩИ ГРАФИКОВ

Здесь также следует различать два случая.

1°. Водобойная стенка образует неподтопленный водослив. Для определения  $c_0$  в этом случае Н. Н. Павловский дает следующую формулу:<sup>1</sup>

$$c_0 = h_k \left( z - \frac{1}{\sqrt{2m^2}} \right), \quad (12-73)$$

где  $m$  — коэффициент расхода водобойной стенки.

Как видно, в формулу (12-73) входит неизвестная величина  $z$ , показанная на рис. 12-26. Для нахождения ее имеем специальный график построенный Н. Н. Павловским, и несколько видоизмененный М. Д. Чертоусовым (рис. 12-29). Обозначения  $\xi_0$  и  $\varphi_c$ , указанные на этом графике, известны из предыдущего (см. конец § 12-2).

2°. Водобойная стенка образует подтопленный водослив (рис. 12-26). Согласно Н. Н. Павловскому, теоретическая высота стенки в данном случае устанавливается по формуле

$$c_0 = h_k \left( \xi_{sc}'' - \frac{\zeta'}{\eta_{ш}} \right), \quad (12-74)$$

где относительная величина

$$\xi_{sc}'' = \frac{h_c''}{h_k} \quad (12-75)$$

может быть найдена (зная  $\varphi_c$ ,  $E_0$ ,  $\varphi_c$ ,  $m$ ) по графику на рис. 12-5.

Относительная величина  $\zeta'$  может быть легко определена:

$$\zeta' = \frac{h_c'' - h_{ш}}{h_k} = \xi_{sc}'' - E_{ш} \quad (12-76)$$

где  $E_{ш} = h_{ш}/h_k$ .

<sup>1</sup> Весьма простой вывод ее здесь не приводим.

Что касается неизвестной величины

$$\eta_{\text{н}} = \frac{h'_e - h_n}{H} = \frac{Z'}{H'}$$

то она находится по специальному графику на рис. 12-30<sup>1</sup>

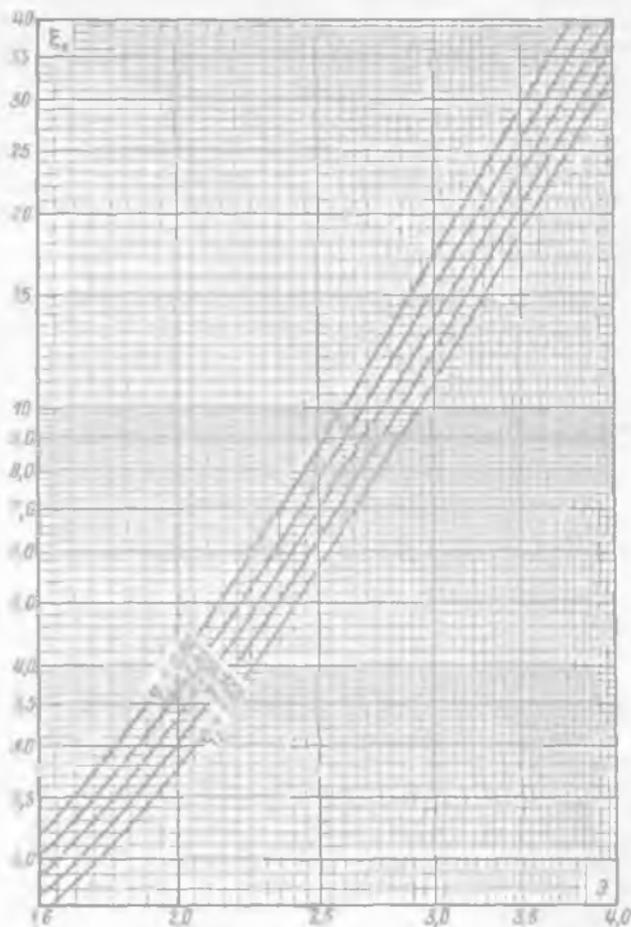


Рис. 12-29 График для определения высоты неподогретой водобойной стенки (плоская задача)

Для отыскания  $\eta_{\text{н}}$  по этому графику предварительно необходимо вычислить особые величины  $A_0$  и  $B_0$ :

<sup>1</sup> Здесь вместо графика Н. Н. Павловского приводим несколько более удобный график М. Д. Чертоусова. Вопрос о построении этого графика не касается

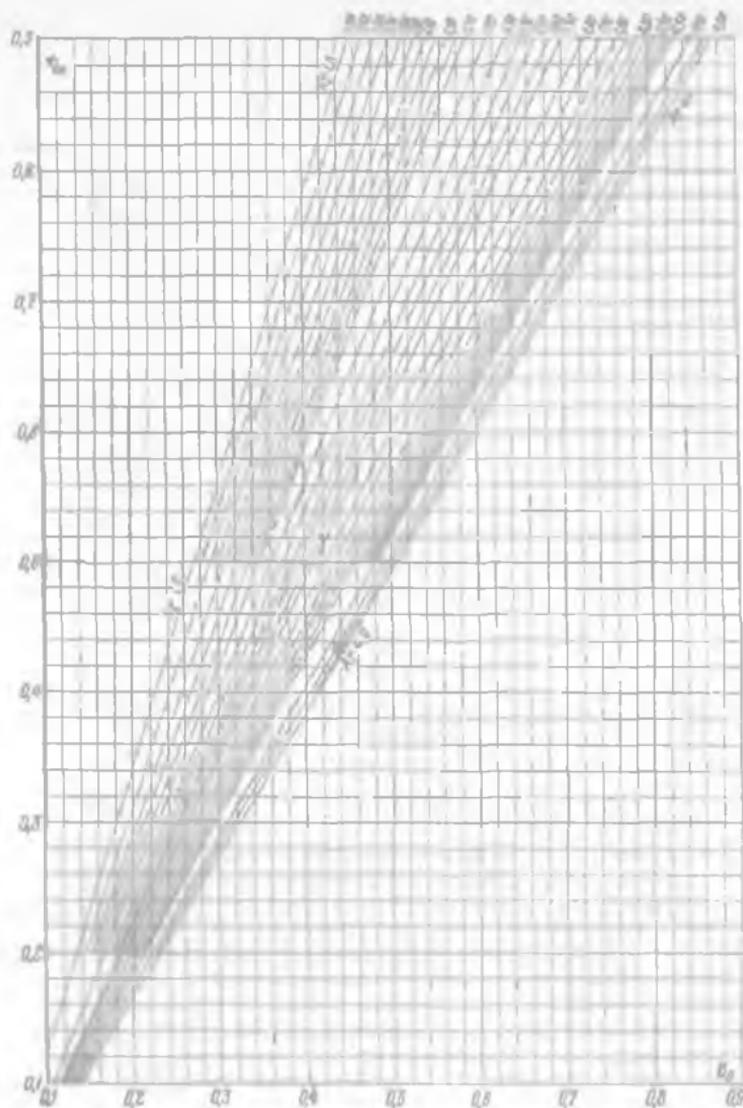


Рис. 12-30. График для определения высоты подтопленной водобойной стенки (плоская задача)

$$A_0 = \sqrt{\frac{\xi_{\text{ст}}}{2m^2}} \quad (12-77)$$

$$B_0 = \zeta \sqrt{2m^2} \quad (12-78)$$

Найдя  $s_0$ , практическую высоту водобойной стенки  $s$ , обеспечивающую необходимую степень затопления прыжка, определяем, как указано в п. 1' § 12-Б.

§ 12-10. РАСЧЕТ ДЛИНЫ ВОДОБОЙНЫХ КОЛОДЕЦ, ОБРАЗОВАННЫХ ВОДОБОЙНЫМ УСТУПОМ И ВОДОБОЙНОЙ СТЕНКОЙ

Выше для краткости изложения мы пользовались терминами: водобойный колодец и водобойная стенка. Однако правильнее было бы применять, как предлагал Н. Н. Павловский, термины «водобойный колодец, образованный водобойным уступом» и «водобойный колодец, образованный водобойной стенкой». Пользуясь далее этими терминами, обратимся теперь к определению горизонтальных размеров колодцев, причем будем искать их длину  $L_{\text{кд}}$ .

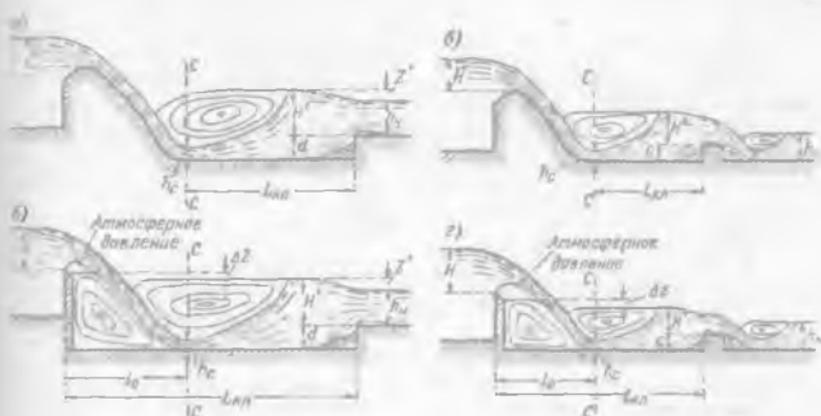


Рис. 12-31. Схема течения воды в пределах водобойных колодцев (модель Рейнольдса — Буссинеска)

Представим на рис. 12-31 схемы потоков, получающихся в случае устройства колодцев, образованных водобойным уступом (рис. 12-31, а, б) и водобойной стенкой (рис. 12-31, в, г).<sup>1</sup>

Как видно из этих чертежей, приходится различать:

1-й случай, когда колодец устраивается за водосливной плотиной плавного очертания (рис. 12-31, а, в): здесь длину колодца  $L_{\text{кд}}$  измеряют от сечения С—С, местоположение которого определяется конструкцией плотины;

2-й случай, когда колодец устраивается за вертикальной стенкой падения (рис. 12-31, б, г): здесь длину колодца измеряют не от сечения С—С, а от вертикальной стенки падения (см. чертеж), причем длина колодца сравнительно с первым случаем увеличивается на величину дальности боя струи  $l_0$ . Со 2-ым случаем приходится сталкиваться при расчете, например, перепалов (см. далее).

В этом параграфе остановимся на рассмотрении только 1-го случая. Как видно из рис. 12-31, а, в, в колодце при наличии в нем затопленного прыжка образуются два вальца с горизонтальной осью, способствующие значительной диссипации энергии потока.

<sup>1</sup> На рис. 12-31 показаны картины действительного протекания воды в колодцах, а не те условные, из рассмотрения которых выше определяли теоретические размеры  $l_0$  и  $s_0$ . Заметим, что на рис. 12-31 водоворотные области (вальцы) изображены замкнутыми линиями тока, т. е. теми линиями тока, которые относятся к осредненному (во времени) движению (согласно модели Рейнольдса — Буссинеска).

В случае рис 12-31, б, г в колодце под струей появляется еще третий валец. Обратим внимание, что горизонт воды под струей, несмотря на наличие в этом месте атмосферного давления (предполагаем что подвол воздуха под струю обеспечен), устанавливается всегда несколько выше (на величину  $\Delta z$ ) горизонта воды в колодце, правее струи.

Длина колодца  $L_{\text{кл}}$  должна быть назначена такой, чтобы верхний и нижний валцы не «перекрывали» друг друга, т. е. чтобы перед водобойным уступом или водобойной стенкой имелся участок потока, в вертикальные сечения которого валцы не попадали; при таком условии нормальный подход воды к водобойному уступу или водобойной стенке будет обеспечен.

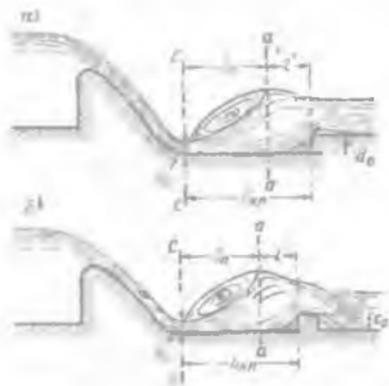


Рис. 12-32 Расчетные схемы течения воды в пределах колодца

Имея в виду это соображение, представим на рис. 12-32 теоретический случай (из рассмотрения которого выше устанавливали величины  $d_0$  и  $\epsilon_0$ ); как видно, здесь  $L_{\text{кл}}$  намечена



Рис. 12-33 Разрыв грунта при недостаточной длине водобойного колодца

такой что вертикальное сечение  $a-a$ , проведенное в конце верхнего вальца, отвечает началу нижнего вальца

Рассматривая рис. 12-32, для искомой длины колодца  $L_{\text{кл}}$  можно было бы написать следующую формулу:

$$L_{\text{кл}} = l_0 + l', \quad (12-79)$$

где  $l_0$  — длина свободного незатопленного прыжка;  $l'$  — длина нижнего вальца.

Однако, как показывают опыты, формула (12-79), полученная из рассмотрения теоретического случая (рис. 12-32), дает завышенные значения  $L_{\text{кл}}$ .

Дело в том, что в колодце получается несвободный прыжок, длина которого меньше длины свободного прыжка, рассмотренного в гл. 8. К тому же в действительности мы имеем затопление прыжка.

В связи с этими обстоятельствами ряд авторов предлагает зависимости, дающие для  $L_{\text{кл}}$  размер меньший, чем формула (12-79). В частности, М. Д. Чертоусов длину водобойного колодца рекомендует определять по следующей эмпирической формуле:

$$L_{\text{кл}} = \beta l_0, \quad (12-80)$$

где  $l_0$  — длина свободного незатопленного прыжка (см. § 8-5);  $\beta$  — некоторый эмпирический коэффициент, принимаемый равным:

$$\beta = 0,7 - 0,8. \quad (12-81)$$

Подчеркнем, однако, что если длина колодца в проекте плотины будет принята недостаточной, то при этом можем получить весьма опасную картину протекания воды (рис. 12-33): струя выйдет из колодца без образования

прыжка<sup>1</sup> и, ударяясь о дно нижнего бьефа за колодез, может произвести разрушение крепления и размыв дна нижнего бьефа

## § 12-11 РАСЧЕТ ПЛОТИНЫ С НИЗКИМ УСТУПОМ

Выше вскоду имели в виду случай, когда водосливная поверхность плотины плавно сопрягалась с поверхностью водобоя. В практике, однако, встречаются плотины, имеющие в конце сливной поверхности уступ:

а) или низкий, поверхность которого расположена ниже горизонта воды нижнего бьефа,

б) или высокий, поверхность которого расположена выше горизонта воды нижнего бьефа.

В этом параграфе рассмотрим плотину с низким уступом (рис. 12-34).<sup>2</sup> Такие плотины устраивают, когда во время ледохода в нижний бьеф приходится пропускать большие массы льда. Уступ плотины или в верхней своей части имеет плоский носок  $kn$ , сбрасывающий воду и лед в нижний бьеф.

Рассматривая плотину с уступом, будем пользоваться обозначениями:  $a$  — высота уступа;  $\theta$  — угол наклона к горизонту носка уступа (принимается равным  $0-12^\circ$ );  $R$  — радиус кривой, по которой очерчена водосливная поверхность плотины при подходе к носку;  $(h_c)_{уст}$  — сжатая глубина, устанавливающаяся в конце носка на уступе (рис. 12-35).<sup>3</sup> Остальные обозначения сохраним прежние.

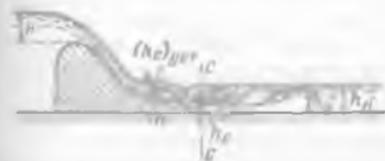


Рис. 12-35. Донный режим

В случае плотины с низким уступом различают следующие основные типы (режимы) сопряжения бьефов.<sup>3</sup> 1-й режим: донный (рис. 12-35). Здесь струя воды, сойдя с носка, падает на дно нижнего бьефа; при этом сжатое сечение струи устанавливается у дна и наибольшие скорости в сечении  $C-C$  (рис. 12-35) при затопленном прыжке наблюдаются вблизи дна. На рис. 12-35 сплошными линиями представлен донный режим, когда гидравлический прыжок затоплен: жирной штриховой линией — когда прыжок отогнан от сечения  $C-C$ .

Донный режим имеет место при относительно малой глубине воды в нижнем бьефе, когда

$$h_n < h_{кр} \quad (12-82)$$

<sup>1</sup> Напомним, что гашение энергии главным образом обуславливается гидравлическим прыжком.

<sup>2</sup> Первые теоретические расчеты этого типа плотин были предложены А. А. Сабаневым в связи с проектированием Волховской ГЭС.

<sup>3</sup> В этом параграфе, как и в предыдущих, имеем в виду случай, когда дно нижнего бьефа за плотинной имеет малый уклон (движение воды в нижнем бьефе вдали от плотины — спокойное).

причем здесь глубина  $h_{\text{пр1}}$  может быть названа первой предельной глубиной нижнего бьефа

Вопрос об отгоне или затоплении гидравлического прыжка в сечении С—С решается в случае донного режима, как указывалось в § 12-3.

2-й режим: поверхностный с незатопленной струей (рис. 12-36). Здесь струя не падает на дно, а находится на поверхности воды нижнего бьефа; при этом наибольшие скорости потока наблюдаются вблизи его свободной поверхности. В этом случае имеется один валец воды с горизонтальной осью, расположенный под транзитной струей.<sup>1</sup>



Рис. 12-36. Поверхностный режим с незатопленной струей



Рис. 12-37. Поверхностный режим с затопленной струей

Второй режим получается, когда

$$h_{\text{пр1}} < h_n < h_{\text{пр1}}^* \quad (12-83)$$

где глубина  $h_{\text{пр1}}$  может быть названа второй предельной глубиной нижнего бьефа.

3-й режим: поверхностный с затопленной струей (рис. 12-37). Здесь появляется второй валец, расположенный над транзитной струей. Этот режим получается, когда

$$h_{\text{пр1}} < h_n \quad (12-84)$$

Предположим, что нам заданы:  $E$ ,  $a$  и  $q$ , а также угол  $\theta$  (рис. 12-34).

Представим себе, что при таких данных глубина воды в нижнем бьефе  $h_n$  постепенно увеличивается, начиная от некоторой небольшой величины. При этом получаем следующее:

- 1) пока  $h_n < h_{\text{пр1}}$ , имеем, как было отмечено выше, донный режим;
- 2) при  $h_n = h_{\text{пр1}}$  донный режим переходит в поверхностный режим с незатопленной струей;
- 3) при  $h_n = h_{\text{пр1}}^*$  поверхностный режим с незатопленной струей переходит в поверхностный режим с затопленной струей.

Проектируя плотину с низким уступом, высоту  $a$  этого уступа стремятся выбрать такой, чтобы в период ледохода имел место второй режим: поверхностный с незатопленной струей. Здесь имеют в виду, что при таком режиме лед, сбрасываемый через плотину:

- а) не ударяется о крепление дна нижнего бьефа и не повреждает его, что может иметь место в случае донного режима;
- б) не задерживается над транзитной струей, что получаем в случае затопленной струи, когда льдины, попавшие в верхний валец, вращаются вместе с водой, причем могут ударяться о поверхность носка и повреждать его.

В связи со сказанным задачу о гидравлическом расчете уступа обычно ставят так: задаются несколькими высотами уступа  $a$  и для каждой такой высоты находят свои предельные глубины:  $h_{\text{пр1}}$  и  $h_{\text{пр1}}^*$ . Далее, зная диапазон глубин нижнего бьефа  $h_{\text{н}}^0$  отвечающих «ледоходным расходам», выбирают,

<sup>1</sup> Говоря о вальцах, имеем в виду осредненное (во времени) движение воды (см. § 4-14)

по возможности, такую высоту  $a$ , при которой все имеющиеся глубины  $h_m^0$  удовлетворяют соотношению

$$h_{\text{прI}} < h_m^0 < h_{\text{прII}} \quad (12-85)$$

Как видно, для решения такой задачи надо уметь найти при заданных  $E$ ,  $a$  и  $q$  соответствующие величины  $h_{\text{прI}}$  и  $h_{\text{прII}}$ . Обратимся к рассмотрению этого вопроса.

1°. Теоретическое определение первой предельной глубины по заданным  $E$ ,  $a$  и  $q$ . Рассматриваем момент перехода донного режима в поверхностный с незатопленной струей, т. е. случай, когда

$$h_m = h_{\text{прI}} \quad (12-86)$$

Обозначим через  $h_m$  разность между пьезометрической высотой в точке  $m$  и заглублением этой точки под свободной поверхностью потока в месте расположения точки  $A$ , отвечающей «сжатому» живому сечению  $Am$  (рис. 12-38, а, б, в, г). Как видно,  $h_m$  представляет собой превышение давления в точке  $m$  над давлением в этой же точке, полученным согласно гидростатическому закону.

На основании опытов Т. Н. Астафичевой было установлено, что при наличии равенства (12-86) величина  $h_m$ , записываемая в данном случае в виде  $h_{m_1}$ , может быть представлена эмпирической формулой:

$$h_{m_1} \approx 0,31 h_{\text{прI}} - 0,50 a \quad (12-87)$$

Соединяя далее уравнением Бернулли сечения  $b-b$  и  $I-I$  (рис. 12-38, а), получаем уравнение для сжатой глубины на уступе  $(h_c)_{\text{уст}}$  [аналогичное уравнению (12-12)]:

$$E_0 = a + (h_c)_{\text{уст}} \cos \theta + \frac{q^2}{2g (h_c)_{\text{уст}}^3 \varphi_c^2} + \frac{1}{2} h_{m_1} \quad (12-88)$$

где  $\varphi_c$  — коэффициент скорости, учитывающий потери напора между сечениями  $b-b$  и  $I-I$ ;  $E_0$  — величина  $E$ , записанная с учетом скорости подхода  $v_0$ .

Наконец, соединяя сечения потока по линиям  $I'-I'$  и  $n-n$  уравнением количества движения (в проекциях на ось  $x$ , направленную вдоль течения),<sup>1</sup> получаем (после соответствующего преобразования этого уравнения):

$$\frac{2q^3}{g (h_c)_{\text{уст}} h_{\text{прI}}} [(h_c)_{\text{уст}} - h_{\text{прI}} \cos \theta] = [(h_c)_{\text{уст}} \cos \theta + a]^2 + [2a + (h_c)_{\text{уст}} \cos \theta] h_{m_1} - h_{\text{прI}}^2 \quad (12-89)$$

При выводе уравнения (12-89) пользуемся следующими допущениями:

- считаем, что гидродинамическое давление вдоль вертикальной стенки уступа  $mn$ , в также вдоль вертикали  $B-C$  распределяется по линейному закону;
- полагаем, что сила внешнего трения вдоль стенки  $nC$  (вдоль дна) пренебрежимо мала.

Уравнения (12-87), (12-88) и (12-89) представляют собой систему трех уравнений с тремя неизвестными:  $(h_c)_{\text{уст}}$ ;  $h_{m_1}$ ;  $h_{\text{прI}}$ . Решая эту систему уравнений путем подбора, находим величину  $h_{\text{прI}}$ .<sup>2</sup>

2°. Теоретическое определение второй предельной глубины  $h_{\text{прII}}$  по заданным  $E$ ,  $a$  и  $q$ . Рассматриваем момент перехода незатопленной поверхностной струи в затопленную, т. е. случай, когда

$$h_m = h_{\text{прII}} \quad (12-90)$$

На основании опытов Т. Н. Астафичевой было установлено, что при наличии равенства (12-90) величина  $h_m$ , записываемая в данном случае в виде  $h_{m_2}$  (рис. 12-38, г), может быть представлена эмпирической формулой

$$h_{m_2} \approx 0,59 (h_{\text{прII}} - a) \quad (12-91)$$

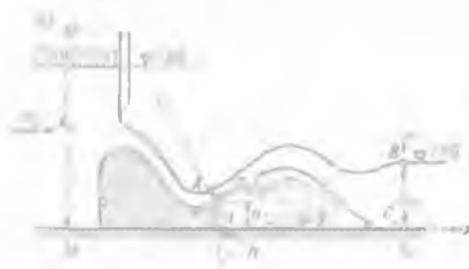
<sup>1</sup> Как видно из рис. 12-38, а, этими двумя сечениями выделяется отсек жидкости  $mnABCn$ .

<sup>2</sup> Как здесь, так и ниже дно нижнего бьефа считаем горизонтальным ( $i = 0$ ).

Используя далее, как и в предыдущем пункте, уравнение Бернулли и уравнение количества движения, получаем соответственно два уравнения

$$E_0 = a + (h_c)_{уст} \cos \theta + \frac{q^2}{2g (h_c)_{уст}^2 \varphi_c^2} + \frac{1}{2} h_{m2}; \quad (12-92)$$

$$\frac{2q^2}{g (h_c)_{уст} h_{прп}} [(h_c)_{уст} - h_{прп} \cos \theta] = [(h_c)_{уст} \cos \theta + a]^2 + [2a + (h_c)_{уст} \cos \theta] h_{m2} - h_{прп} \quad (12-93)$$



Решив систему трех уравнений (12-91), (12-92) и (12-93) относительно  $(h_c)_{уст}$ ,  $h_{m2}$ ,  $h_{прп}$  находим искомую величину  $h_{прп}$ .

3°. Экспериментальные формулы для определения величин  $h_{прп}$  и  $h_{прп1}$ . В результате приведенного выше решения (п. 1 и 2) получили весьма громоздкие формулы, требующие большой вычислительной работы для отыскания искомых величин.

Имея это в виду, вместо указанных

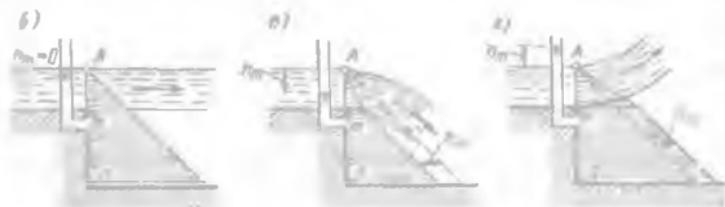


Рис 12-38 Расчетные схемы истечения воды при наличии низкого уступа плотины

выше уравнений Т. Н. Астафичева предложила следующие достаточно простые экспериментальные формулы, служащие для непосредственного определения  $h_{пр1}$  и  $h_{прп1}$

$$h_{пр1} = 0,82a + \left(2,44 - 2,0 \frac{a}{c_n}\right) h_k, \quad (12-94)$$

$$h_{прп1} = 1,22a + \left(2,50 - 2,55 \frac{a}{c_n}\right) h_k, \quad (12-95)$$

где  $h_k$  — критическая глубина.

Сброс льда в нижний бьеф осуществляется при полном открытии затворов, когда плотина работает как водослив. Именно для этого случая и были получены формулы (12-94) и (12-95). Однако, как показали дополнительные опыты, данные формулы при  $H \leq \frac{2}{3} c_n$  могут применяться с некоторым приближением и при неполном открытии затворов.

Первая из этих формул справедлива только для случая  $\frac{a}{c_n} \geq 0,2$ , что обычно имеет место в практике. Для случая  $\frac{a}{c_n} < 0,2$  вместо (12-94) Т. Н. Астафичева рекомендует зависимость

$$h_{пр1} = 0,82a + \left(3,44 - 7,00 \frac{a}{c_n}\right) h_k, \quad (12-94')$$

4°. Дополнительными замечаниями. В заключение параграфа приведем следующие замечания.

1. С поднятием горизонта воды нижнего бьефа давление в вальце под струей в точке  $m$  (рис. 12-35) увеличивается. Это давление уравновешивается давлением транзитной струи, действующим сверху на валец. Величина давления транзитной струи, действующего на водоворот, зависит от кривизны обрезающих ее линий тока. Если бы струя сходила с горизонтального носка, имея строго горизонтальное направление (рис. 12-38, б), то под струей давление распределялось бы в соответствии с гидростатическим законом: давление в любой точке уступа  $mn$  выражалось бы заглублением этой точки под уровнем воды на носке. Когда же выпуклость искривленной струи в точке оказывается направленной вверх, под струей получаем давление меньшее, чем давление отвечающее уровню воды на носке (рис. 12-38, в); наоборот, при направлении выпуклости струи вниз (в точке  $m$ ) под струей за счет центробежных сил инерции давление будет больше гидростатического (рис. 12-38, з).



Рис. 12-39. Поверхностно-донный режим

Из сказанного ясно, что с поднятием горизонта воды в нижнем бьефе кривизна струи в точке  $m$  должна изменяться, причем в результате этого изменения донный режим (когда выпуклость оси струи при сходе с носка направлена вверх) должен переходить, как говорилось выше, в поверхностный режим (когда выпуклость струи при сходе ее с носка направлена вниз).

2. В некоторых условиях поверхностному режиму с незаопленной струей может отвечать небольшой диапазон глубин нижнего бьефа, не охватывающий всех тех глубин нижнего бьефа, которые могут иметь место при ледоходе.

3. Как показывают опыты, при малой высоте уступа поверхностного режима в нижнем бьефе вообще получить нельзя; в этом случае может иметь место только донный режим.

4. При  $a < 0,2c_k$  наблюдается обычно неустойчивый режим сопряжения бьефов (так называемая зона периодической смены режимов). Поэтому высоту уступа  $a$  не рекомендуется назначать менее  $0,2c_k$ .

5. При определенных условиях, когда глубина нижнего бьефа удовлетворяет соотношению (12-83), в нижнем бьефе может возникнуть еще так называемый поверхностно-донный режим, т. е. режим, поверхностный вблизи водослива и донный вдали от водослива (см. рис. 12-39).

6. Изменение угла  $\theta$  в пределах от 0 до  $15^\circ$  почти не влияет на величины глубин  $h_{пр}$  и  $h_{пр1}$ .

7. Помимо приведенного выше теоретического решения, основанного на работах А. А. Сабанеева, и решений Т. Н. Астафичевой, в литературе встречаются еще и решения данного вопроса, разработанные Д. И. Куминим, И. И. Левн, М. Д. Чертоусовым, Н. Н. Бельшевским, С. М. Слиским, М. Ф. Складным и другими авторами

## § 12-12. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ О РАСЧЕТЕ ПЛОТИНЫ С ВЫСОКИМ УСТУПОМ

В случае высоких бетонных плотин на скальном основании обычно предусматривают высокий уступ (рис. 12-40). При таком уступе струя, скользящая с носка этого уступа, отбрасывается достаточно далеко от подошвы плотины. В месте падения струи на дно нижнего бьефа образуется воронка размыва. При правильно запроектированной плотине воронка размыва должна располагаться на таком расстоянии от плотины, при котором опасность подмыва последней исключается.

При гидравлическом расчете плотины с высоким уступом возникают две задачи:

1-я задача. При заданной высоте уступа требуется построить траекторию струи и установить при этом место, где в скальном грунте нижнего бьефа должна образоваться воронка размыва. Эта задача решается с учетом соображений, приведенных в § 10-3 и 13-2;

2-я задача. Установить глубину воронки размыва в скальном трещиноватом грунте. Имеется ряд попыток решить эту задачу, однако еще нельзя считать ее решенной достаточно точно и полно.

Анализ 1-й задачи показывает, что наибольший отлет струи получается в случае, когда высота уступа, имеющего горизонтальный носок ( $\theta = 0$ ), равна  $a \approx 0,5E$ . Однако,

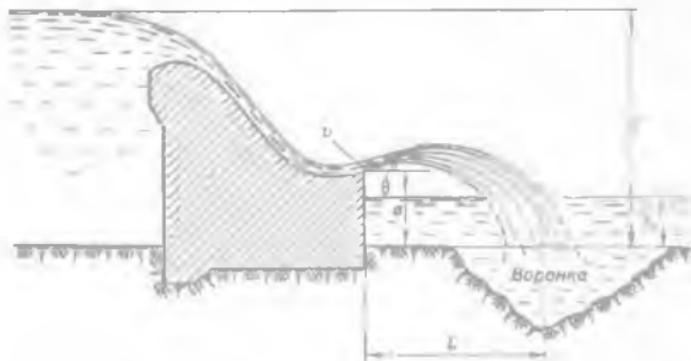


Рис. 12-40 Плотина с высоким уступом

с учетом 2-й задачи, обычно высоту  $a$  назначают только несколько больше глубины  $h_n$  воды в нижнем бьефе.

Некоторые предварительные сведения с приведением расчетных формул, служивших для решения указанных задач, можно найти в [12-5]

### § 12-13. СОПРЯЖЕНИЕ БЬЕФОВ ПРИ ИСТЕЧЕНИИ ВОДЫ ИЗ ДОННОГО НАПОРНОГО ОТВЕРСТИЯ (ИЗ-ПОД ШИТА)

Здесь, как и в случае перелива воды через плотину, различаем три известных нам типа сопряжения бьефов:

- а) с отогнанным прыжком (рис. 12-41, а);
- б) с прыжком в сжатом сечении С—С;
- в) с затопленным прыжком (рис. 12-41, б).

Сжатая глубина  $h_c$  в сечении С—С при истечении из-под шита в канал определяется по формуле

$$h_c = \epsilon_0 e, \quad (12-96)$$

где  $e$  — открытие шита;  $\epsilon_0$  — коэффициент вертикального сжатия струи, равный, например, 0,62—0,64 (при острой нижней кромке затвора).

Отогнанный прыжок получается в случае, когда

$$h_n < h_c'', \quad (12-97)$$

затопленный, — когда

$$h_n > h_c'', \quad (12-98)$$

где  $h_c''$  — глубина фиктивного прыжка в сжатом сечении С—С, вычисленная по основному уравнению прыжка (8-25), как сопряженная с глубиной  $h_c$ . Как видно, критерии сопряжения бьефов остаются теми же, что и в случае перелива воды через плотину.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> В этом параграфе, как и выше, рассматриваем плоскую задачу.

Для определения  $h'_c$ , входящей в формулы (12-97) и (12-98), помимо величины  $h_c$ , необходимо знать еще величину удельного расхода  $q$ , получающуюся при заданном открытии затвора и при заданной величине  $E_0$  в случае схемы на рис. 12-41, а. Для отыскания величины  $q$  соединяем уравнением Бернулли сечение в-в и сечение С-С (рис. 12-41, а). В результате получаем известное уравнение (12-12), которое раньше служило нам для определения глубины  $h_c$ . Решая это уравнение в отношении  $q$ , находим следующую расчетную формулу:

$$q = \frac{Q}{B} = \varphi_c h_c \sqrt{2g(E_0 - h_c)}, \quad (12-99)$$

где  $B$  — ширина рассматриваемого отверстия;  $\varphi_c \geq 0.95$ ; при величине открытия штыа  $e \leq (0.40 \div 0.45) E$  величиной скорости подхода  $v_0$  в этой формуле следует пренебрегать (полагая  $E_0 = E$ ).

Пользуясь формулой (12-99), наряду с основным уравнением прыжка и зависимостями (12-96)–(12-98), можно установить тип сопряжения бьефов, получающийся при заданных величинах  $E_0$ ,  $h_n$  и  $e$ .

В практике часто приходится выяснять тип сопряжения бьефов при заданных величинах  $E_0$ ,  $q$  и  $h_n$ . В этом случае величину  $h_c$  определяем из уравнения (12-99), т. е. по известной зависимости (12-12); найдя же  $h_c$ , вычисляем  $h'_c$  (по уравнению прыжка) и величину  $e$  [по зависимости (12-96)].

Как видно, схема на рис. 12-41, а отличается от плотины без затвора (рис. 12-2) тем, что при расчете такой плотины (отметка гребня которой известна) величину расхода  $q$  всегда можно определить при заданном  $H_0$  из рассмотрения «верхнего водосливного узла» по формуле водослива. Поэтому уравнение (12-99) или, что то же, (12-12) в случае такой плотины всегда служит для определения  $h_c$ . В случае же истечения из-под штыа это уравнение часто приходится использовать для определения расхода (поскольку в данном случае верхний водосливной узел отсутствует).

В отношении формулы (12-99) необходимо указать еще следующее.

На рис. 12-41, а, который мы рассматривали при выводе (12-99), представлено истечение из отверстия. Однако истечение воды здесь происходит не в атмосферу, что имели в виду, например, в § 10-1, а в канал. Поэтому в нижней точке сжатого сечения на рис. 12-41, а имеется давление не атмосферное, а равное  $\gamma h_c$ . Именно этим и объясняется, что в формулу (12-99) под корень входит не заглубление центра тяжести отверстия под уровнем воды верхнего бьефа (см. § 10-1), а величина  $Z_0 = E_0 - h_c$ .

Из сказанного ясно, что, определяя расход воды по формуле истечения из отверстия для схемы, показанной, например, на рис. 12-1, заглублением центра тяжести отверстия под уровнем воды верхнего бьефа можно пользоваться только в том случае, если есть уверенность, что в нижней точке сжатого сечения (верхнего сжатого сечения, получающегося на гребне плотины) давление близко к атмосферному.

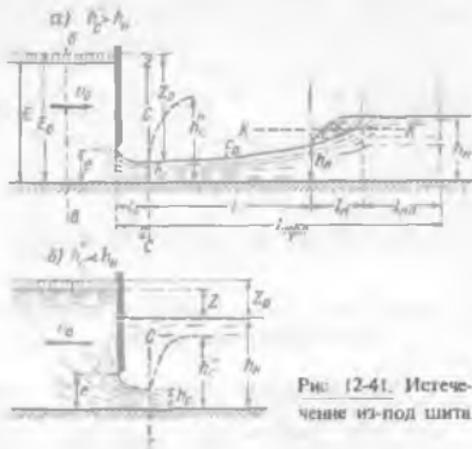


Рис. 12-41. Истечение из-под штыа

Рассмотрим отдельно сопряжение бьефов при затопленном и отогнанном прыжках.

1°. Затопленный прыжок. Схема, показанная на рис. 12-41, б. отвечает относительно большой степени затопления прыжка

$$A = h_n / h_c \quad (12-100)$$

В этом случае поверхность воды нижнего бьефа оказывается примерно горизонтальной, причем полный расход  $Q$  может быть найден по формуле, относящейся к истечению из отверстия:

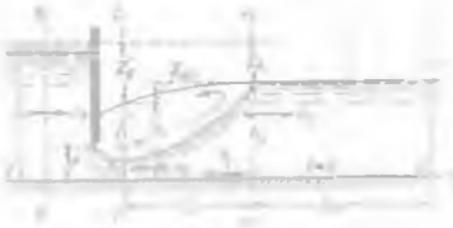


Рис. 12-42. Истечение из-под шита при небольшой степени затопления прыжка

$$Q = \mu_0 \omega \sqrt{2gZ_0} \quad (12-101)$$

где  $\mu_0$  — коэффициент расхода отверстия (о величине  $\mu_0$  см. стр. 383 и 388);  $\omega$  — площадь отверстия;  $Z_0$  — разность уровней воды в верхнем и нижнем бьефах, подсчитанная с учетом скорости подхода. Во многих случаях, однако, скоростью подхода  $v_0$  можно пренебречь и считать, что  $Z_0 \approx Z$ .

В случае относительно небольшой степени затопления прыжка вместо картины на рис. 12-41, б. получаем схему истечения, изображенную на рис. 12-42

Как видно, здесь свободная поверхность в пределах затопленного прыжка поднимается по течению на величину «перепада восстановления»  $Z_{вс}$ . Длину затопленного прыжка  $l_p$  здесь следует определять по формуле (12-37) или (12-38), в которых под величиной  $h_c$  надо понимать  $h_n$ . Длину послепрыжкового участка  $l_{пн}$  находим по данным § 8-1.

Расход  $Q$  в этом случае можно найти по той же формуле (12-101), заменив в ней предварительно величину  $Z_0$  величиной  $Z_0 + Z_{вс}$ .

$$Z_0 = Z_0 + Z_{вс} \quad (12-102)$$

При рассмотрении плоской задачи можно пользоваться также зависимостью (12-99), переписав ее в виде

$$q = \varphi_c h_c \sqrt{2g(E_0 - h_1)} \quad (12-103)$$

где  $h_1$  — глубина воды в сечении С-С (см. чертеж).

Для определения  $h_1$  (зная которую, легко можно найти  $Z_{вс}$ ) соединяем уравнением количества движения (3-124) сечения С-С и  $n-n$ .

Пренебрегая силой внешнего трения на пути от сечения С-С до сечения  $n-n$  и считая, что давление в сечениях С-С и  $n-n$  распределяется по гидростатическому закону, из уравнения (3-124) получаем зависимость

$$2 \frac{q^2}{g} \left( \frac{1}{h_c} - \frac{1}{h_n} \right) = h_n^2 - h_1^2 \quad (12-104)$$

Уравнение Бернулли (12-103), соединяющее сечения  $v-v$  и С-С, и уравнение количества движения (12-104), соединяющее сечения С-С и  $n-n$ , являются системой двух уравнений с двумя неизвестными:  $h_1$  и  $q$  (остальные величины считаем заданными).

Решая эту систему уравнений, получаем следующую расчетную формулу для  $h_1$  [аналогичную зависимости (5-60)]<sup>1</sup>

$$h_1 = \left[ \frac{1}{2} N + \sqrt{\frac{1}{4} N^2 - N \frac{E_0}{h_n} + 1} \right] h_n \quad (12-105)$$

<sup>1</sup> При выводе этой формулы считаем  $\alpha \approx \alpha_0 \approx 1$  и уклон дна русла  $i \approx 0$ .

$$N = 4\varphi_c^2 \left(1 - \frac{h_c}{h_n}\right) \frac{h_c}{h_n} \quad (12-106)$$

причем численное значение  $\varphi_c \approx 0,95$ .

Как показывает исследование уравнения (12-105), учитывать перепад восстановления при истечении из-под шита имеет практический смысл только в случае, когда  $h_n < \sim 2,5e$ , причем величина открытия затвора относительно мала:  $e < (0,15 - 0,20)E_0$ . В противном случае с перепадом восстановления можно не считаться и вести расчет по формуле (12-101).

В заключение отметим, что, пользуясь формулой (3-124), можно также найти величину горизонтального давления  $P$  воды на шит в случае, например, рис. 12-41, а. Действительно, соединяя этой зависимостью сечения  $a-a$  и  $C-C$ , окончательно для одной единицы ширины шита получаем (при  $\alpha_0 = 1,0$ ,  $\iota_0 = 0$ ,  $T_0 = 0$ )

$$P = \frac{1}{2}(E^2 - h_c^2)\gamma - 2\varphi_c^2 h_c (E - h_c)\gamma.$$

2°. Отогнанный прыжок. Длина крепления  $L_{крп}$  нижнего бьефа в случае отогнанного прыжка (рис. 12-41, а) может быть определена по формуле

$$L_{крп} = l_1 + l + l_n + l_{пн} \quad (12-107)$$

где  $l_1$  — расстояние от плоскости отверстия до сжатого сечения  $C-C$ , согласно опытам

$$l_1 \approx (0,5 - 1,0)e; \quad (12-108)$$

$l$  — длина отгона прыжка, определяемая, как длина кривой подпора, сопрягающей глубину  $h_c$  и глубину  $h'_n$ , причем  $h'_n$  находится, как глубина, сопряженная с глубиной отгона  $h_n$ ;  $l_n$  — длина свободного гидравлического прыжка (см. гл. 8);  $l_{пн}$  — длина послепрыжкового участка (см. гл. 8).

Длина крепления  $L_{крп}$ , вычисленная по формуле (12-107), изменяется с изменением открытия  $e$  отверстия. Это изменение длины  $L_{крп}$  происходит главным образом за счет уменьшения или увеличения длины  $l$  отгона прыжка, входящего в формулу (12-107).

Согласно исследованиям Б. А. Мадмана, длина  $l$  зависит от величины открытия шита  $e$  (при  $E = \text{const}$ ), как показано на графике рис. 12-43. Из этого графика<sup>1</sup> видим, что при  $e = 0$  величина  $l = 0$ . По мере открытия шита  $l$  увеличивается и, следовательно, прыжок удаляется от шита. При некотором «расчетном» открытии шита  $e''$  получаем максимальный отгой прыжка ( $l_{\text{макс}}$ ). При дальнейшем открытии  $l$  уменьшается, и прыжок начинает приближаться к шиту, причем при некотором открытии  $e'$  он снова располагается в сжатом сечении  $C-C$ .

Для установления той длины крепления  $L_{крп}$ , которая должна быть окончательно принята в проекте, необходимо знать величину  $l_{\text{макс}}$ , получающуюся при открытии шита  $e''$ , заранее нам неизвестном.

Б. А. Мадман на основании ряда подсчетов установил, что величина  $l_{\text{макс}}$  получается при расходе  $Q''$ , равном

$$Q'' = \frac{Q}{2}. \quad (12-109)$$

где  $Q$  — расход, отвечающий открытию шита  $e'$ , т. е. открытию, при котором прыжок располагается в сжатом сечении.

Величину  $Q'$  легко установить, пользуясь известными гидравлическими зависимостями; зная  $Q$ , по (12-109) находим  $Q''$  и затем по величине  $Q''$  устанавливаем расчетное открытие шита  $e''$ , дающее максимальную длину отгона прыжка.

<sup>1</sup> График на рис. 12-43 получается в предположении, что в канале за шитом (вдали от шита) имеет место равномерное движение воды.

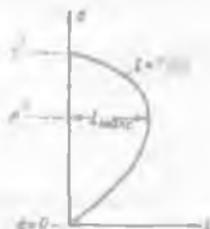


Рис. 12-43. Зависимость длины  $l$  отгона прыжка от открытия  $e$  шита

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 12-1. Беляшевский Н. Н. Сопряжение бьефов за водосливными плотинами с носком. — Киев: Изд-во АН УССР, 1953.
- 12-2. Кумини Д. И. Сопряжение бьефов при поверхностном режиме. — Л.-М: Госэнергоиздат, 1948.
- 12-3. Павловский Н. Н. Гидравлический справочник. — Л.-М: ОНТИ НКТП, 1937.
- 12-4. Павловский Н. Н. Собрание сочинений, Т. 1. — М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1955.
- 12-5. Чергоусов М. Д. Гидравлика/Специальный курс. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962.
- 12-6. Чугаев Р. Р. Гидротехнические сооружения/Водосливные плотины. — М.: Высшая школа, 1978.

## ГЛАВА ТРИНАДЦАТАЯ

### ПЕРЕПАДЫ

#### § 13-1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

На каналах, трассируемых по местности с большим уклоном, в частности устраиваемых для сброса воды в обход так называемых глухих плотин, приходится делать перепады (см. гл. 6) или быстротоки, т. е. короткие каналы с весьма большим уклоном, русло которых образовано прочным материалом (бетоном и т. п.).

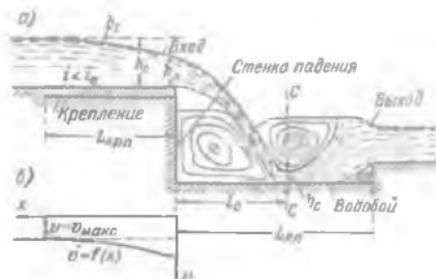


Рис. 13-1. Одноступенчатый перепад

$v_{\max}$  — максимальная допустимая скорость для канала без крепления



Рис. 13-2. Многоступенчатый перепад:

а — колесный, б — безколесный

Освещая в настоящей главе расчеты перепадов, а в следующей главе — расчеты быстротоков, будем иметь в виду, как и выше в гл. 12, в основном только плоскую задачу. Вместе с тем подчеркнем, что часто при проектировании подобных сооружений недопустимо пренебрегать пространственными условиями движения воды в них (например, когда цилиндрическое русло, в котором происходит бурное движение воды, имеет повороты в плане, или когда происходит сжатие бурного потока в плане и т. п.). Учитывая это, в гл. 15 специально рассмотрим основы так называемой плановой задачи движения воды, решение которой позволяет внести некоторые коррективы в расчеты, выполненные на основе рассмотрения плоской задачи, и тем самым несколько приблизить результаты этих расчетов к действительности (в тех случаях, когда указанные выше условия — повороты русла, его сужения и т. п. — существенно