

Принимаем согласно рекомендациям СНиП (табл. П.22.1) $b = 7$ м. Тогда коэффициент бокового сжатия по (22.28) при $H_0 \approx H$

$$\varepsilon = 1 - a \frac{H_0}{b + H_0} = 1 - 0,06 \frac{2,5}{7 + 2,5} = 0,984.$$

С учетом коэффициента бокового сжатия вновь найдем

$$b = \frac{Q_1}{\varepsilon m \sqrt{2g} H_0^{3/2}} = \frac{57,5}{0,984 \cdot 0,49 \cdot 4,43 \cdot 2,5^{3/2}} = 6,81 \text{ м.}$$

В связи с необходимостью использовать при проектировании стандартное значение $b = 7$ м и принимая здесь $m = 0,50 - 0,012 \frac{H}{p_1} = 0,50 -$

$- 0,012 \frac{2,5}{9} = 0,497$, получаем, что расчетное значение напора

$$H = \left(\frac{Q_1}{\varepsilon m b \sqrt{2g}} \right)^{2/3} = \left(\frac{57,5}{0,984 \cdot 0,497 \cdot 7 \cdot 4,43} \right)^{2/3} = 2,43 \text{ м.}$$

Таким образом, при неизменной максимальной отметке воды в верхнем бьефе следует увеличить отметку гребня водослива против предполагавшейся на 0,07 м, т. е. высота плотины станет $H = 7,07$ м. Уточнения коэффициентов бокового сжатия и расхода будут столь незначительными, что необходимость этих исправлений отпадает.

Отметим, что, как и в предыдущем примере, $\sigma_n = 1$; $\sigma_\phi = 1$.

Глава 23

ИСТЕЧЕНИЕ ИЗ-ПОД ЗАТВОРОВ

23.1. Виды истечения. Сжатая глубина

Отверстия водопропускных, водозаборных и водосбросных сооружений обычно перекрывают затворами (плоскими одиночными или сдвоенными, вертикальными или наклонными, сегментными, секторными, цилиндрическими с горизонтальной осью и др.) Поднимаемая затворы на определенную высоту, можно пропустить через отверстие необходимые расходы.

Отверстия, которые перекрываются затворами, обычно имеют прямоугольное сечение. Затворы могут быть расположены: над дном (не обязательно горизонтальным), не имеющим порога (рис. 23.1, а); перед перепадом (уступом) или быстротоком (рис. 23.1, б); в начале водослива с широким порогом (рис. 23.1, в); на гребне водослива практического профиля криволинейного очертания (рис. 23.1, г).

Во всех этих схемах могут устанавливаться как плоские, так и криволинейные затворы (на рис. 23.1 в качестве примера показаны плоские затворы). Области применимости (размеры перекрываемых пролетов, напоры) и конструктивные особенности различных затворов изучаются в курсе гидротехнических сооружений.

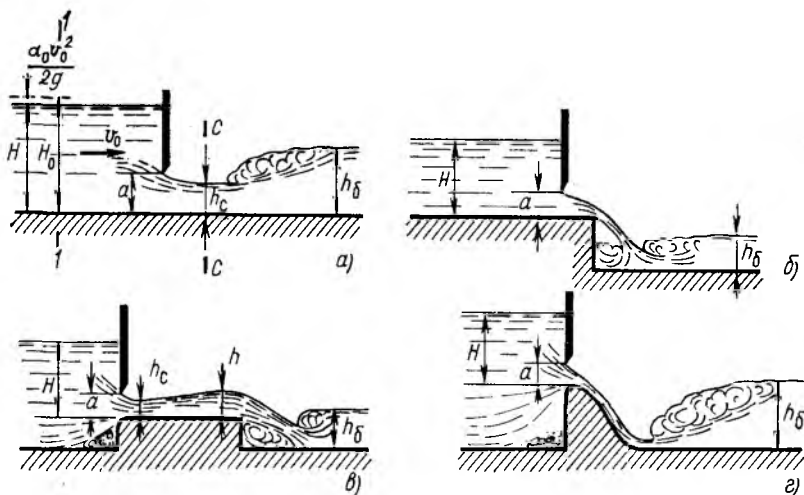


Рис. 23.1

Примем следующие обозначения: H — глубина перед отверстием (напор); a — высота поднятия затвора (высота отверстия); b — ширина перекрываемого отверстия; $h_б$ — бытовая глубина в нижнем бьефе.

Рассмотрим сначала истечение из-под плоского вертикального затвора с острой низовой кромкой, установленного без порога (рис. 23.1, а). Истечение происходит в условиях плоской задачи. Так же как и при истечении из отверстий, поток, выходя из-под затвора, испытывает сжатие в вертикальной плоскости. На некотором расстоянии от затвора (приблизительно a) наблюдается сжатая глубина, равная

$$h_c = \varepsilon a, \quad (23.1)$$

где ε — коэффициент вертикального сжатия.

Н. Е. Жуковский для потенциального движения жидкости при истечении из отверстия получил теоретическую зависимость для коэффициента вертикального сжатия, которая имеет вид

$$\varepsilon = f(a/H), \quad (23.2)$$

т. е. для плоской задачи коэффициент вертикального сжатия зависит только от относительного поднятия затвора a/H .

По Н. Е. Жуковскому

$$\varepsilon = \frac{\pi}{\pi + 2 \frac{2\theta}{\operatorname{tg} 2\theta}},$$

а угол θ находится из выражения

$$\operatorname{tg} \theta \left(1 + \frac{2}{\pi} - \frac{2\theta}{\operatorname{tg} 2\theta} \right) = \frac{\omega}{\Omega} \quad \left(\text{или равно } \frac{a}{H} \right),$$

где ω — площадь отверстия; Ω — площадь живого сечения подходящего к отверстию потока. При отсутствии бокового сжатия $\omega/\Omega = a/H$.

При $\omega/\Omega \rightarrow 0$ формула Жуковского дает значение коэффициента сжатия, совпадающее с также полученной теоретически формулой Кирхгофа

$$\varepsilon = \frac{\pi}{\pi + 2} \approx 0,611.$$

При увеличении ω/Ω или a/H растет и значение коэффициента сжатия ε .

Для рассматриваемого случая по уравнениям, полученным Н. Е. Жуковским, затем были вычислены коэффициенты вертикального сжатия (табл. 23.1).

Интересно отметить, что при $a/H = 0,1$ (верхняя граница отношения размера отверстия к напору, соответствующая «малому» отверстию) коэффициент ε , равный по табл. 23.1 0,615, близко совпадает с теоретически полученным Кирхгофом значением ($\varepsilon = 0,611$) и экспериментально найденным (для достаточно больших Re). Относительное открытие затвора $a/H = 0,75$ по опытам А. И. Богомолова и К. А. Михайлова соответствует началу перехода к истечению через водослив.

По данным С. М. Слисского наличие бокового сжатия потока перед отверстием, перекрываемым затвором, оказывает некоторое влияние на коэффициент вертикального сжатия, однако с доста-

Т а б л и ц а 23.1

a/H	ε	$\Phi (\tau_c)$	$\tau_c = \varepsilon \frac{a}{H}$
0,10	0,615	0,264	0,062
0,15	0,618	0,388	0,092
0,20	0,620	0,514	0,124
0,25	0,622	0,633	0,156
0,30	0,625	0,750	0,188
0,35	0,628	0,865	0,220
0,40	0,630	0,967	0,252
0,45	0,638	1,060	0,284
0,50	0,645	1,182	0,323
0,55	0,650	1,265	0,365
0,60	0,660	1,363	0,395
0,65	0,675	1,457	0,440
0,70	0,690	1,538	0,482
0,75	0,705	1,611	0,529

точной для практических целей точностью пока будем принимать ϵ по табл. 23.1 как в условиях плоской задачи, так и при боковом сжатии.

Если поток в сжатом сечении не испытывает влияния со стороны нижнего бьефа, т. е. сжатое сечение находится под атмосферным давлением, и стечение свободное; если сжатое сечение затоплено некоторым слоем воды, т. е. нижний бьеф влияет на истечение, истечение несвободное (подтопленное).

23.2. Свободное истечение из-под плоских и криволинейных затворов

Свободное истечение происходит, если сопряжение потока в бурном состоянии (сжатое сечение) с потоком, находящимся в спокойном состоянии (нижний бьеф, отводящее русло), имеет форму отогнанного прыжка, т. е. $h_c'' > h_b$, а также если уклон dna отводящего канала $i > i_{кр}$, т. е. в нижнем бьефе поток — в бурном состоянии и отсутствует гидравлический прыжок.

Определим среднюю скорость в сжатом сечении при свободном истечении (рис. 23.1, а). Применим уравнение Бернулли для сечений 1—1 (до затвора на расстоянии, большем H) и С—С.

Строго говоря, на подходе к затвору происходит восстановление потенциальной энергии, т. е. перед затвором глубина воды на участке длиной, примерно равной напору H , постепенно повышается приблизительно на $\alpha v_0^2/2g$. Без учета этого

$$H + \frac{p_{ат}}{\rho g} + \frac{\alpha_0 v_0^2}{2g} = h_c + \frac{p_{ат}}{\rho g} + \frac{\alpha_c v_c^2}{2g} + \Sigma \zeta \frac{v_c^2}{2g};$$

$$2g(H_0 - h_c) = v_c^2(\alpha_c + \Sigma \zeta),$$

откуда

$$v_c = \frac{1}{\sqrt{\alpha_c + \Sigma \zeta}} \sqrt{2g(H_0 - h_c)}.$$

Обозначая, как и ранее, $\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha_c + \Sigma \zeta}}$ — коэффициент скорости,

имеем

$$\left. \begin{aligned} v_c &= \varphi \sqrt{2g(H_0 - h_c)} \\ \text{или} \\ v_c &= \varphi \sqrt{2g(H_0 - \epsilon a)}. \end{aligned} \right\} \quad (23.3)$$

В плоскости отверстия, открытого на высоту a , средняя скорость

$$v = \epsilon v_c = \varphi \epsilon \sqrt{2g(H_0 - \epsilon a)}.$$

Расход при свободном истечении из-под затвора $Q = \omega_c v_c$ определяется по формуле

$$Q = \varphi \epsilon a b \sqrt{2g(H_0 - \epsilon a)} \quad (23.4)$$

или

$$Q = \mu a b \sqrt{2g(H_0 - \epsilon a)}, \quad (23.5)$$

где $\mu = \varphi \epsilon$ — коэффициент расхода.

В ряде случаев, например, при истечении из-под затворов, установленных над водосливом или уступом (рис. 23.1, б, з), за затвором нет четко выраженного сжатого сечения, в котором движение можно было бы считать удовлетворяющим условиям плавной изменяемости. В таких случаях часто применяют формулу (вывод приведен в § 23.4)

$$Q = \mu_1 a b \sqrt{2gH_0},$$

где соотношение коэффициентов расхода μ и μ_1 таково:

$$\mu_1 = \mu \sqrt{1 - \frac{\epsilon a}{H_0}}.$$

Очевидно, что $\mu_1 < \mu$.

Значения коэффициентов скорости принимаются по экспериментальным данным, например для затворов, установленных в отверстиях без порога, $\varphi = 0,95 \div 0,97$, а для затворов, установленных над широким порогом, коэффициент скорости изменяется в больших пределах: $\varphi = 0,85 \div 0,95$. Коэффициент вертикального сжатия принимают по табл. 23.1 в зависимости от задаваемого a/H .

Если уклон отводящего русла $i < i_{кр}$, надо проверить, будет ли истечение из-под затвора свободным. Гидравлический прыжок в нижнем бьефе будет отогнанным, если $h_c'' > h_6$. Учитывая, что для совершенного гидравлического прыжка в прямоугольном русле $h_c'' = 0,5 h_c [\sqrt{1 + 8\Pi_{к.с}} - 1]$, и подставляя с учетом (23.3), $v_c^2(g h_c) = 2\varphi^2 (H_0/h_c - 1)$, из условия $h_c'' > h_6$ имеем, что истечение из-под затвора будет свободным, если выполняется неравенство

$$\frac{h_6}{h_c} \left(\frac{h_6}{h_c} + 1 \right) < 4\varphi^2 \left(\frac{H_0}{h_c} - 1 \right). \quad (23.6)$$

В этом случае гидравлический прыжок будет отогнанным.

Высота подъема затвора, необходимая для пропуска заданного расхода Q , может быть найдена на основе использования (23.4) двумя способами: 1) подбором и 2) по методике, предложенной И. И. Агроскиным.

Применим второй способ. Так как ϵ является функцией относительного открытия a/H , то для каждого значения a/H найдены произведения $\epsilon a/H$, равные h_c/H .

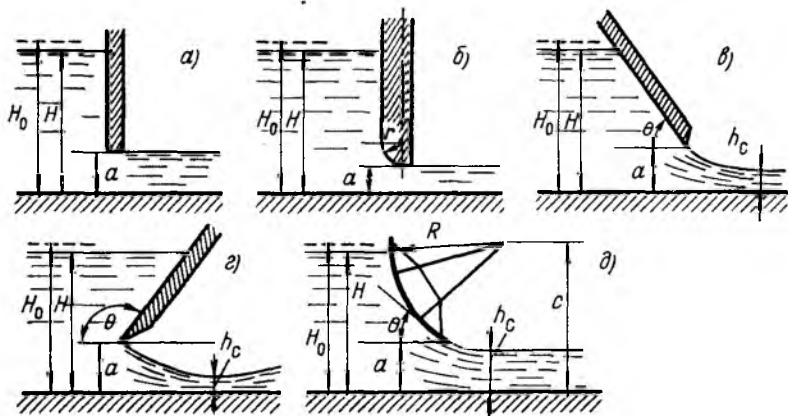


Рис. 23.2

Если принять $H \approx H_0$, можно перейти к безразмерной относительной глубине $\tau_c = \varepsilon \frac{a}{H}$. При этом учтено, что в случае истечения из-под затвора без порога $H = E \approx E_0$.

Затем можно вычислить значения функции

$$\Phi(\tau_c) = 4,43\tau_c \sqrt{1 - \tau_c}$$

для каждого из значений $\varepsilon a/H = \tau_c$.

В табл. 23.1 приведены вычисленные значения τ_c и $\Phi(\tau_c)$.

Таким образом, получена связь между $\Phi(\tau_c)$ и a/H . По известным значениям Q , H и φ можно определить

$$\Phi(\tau_c) = \frac{q}{\varphi E_0^{3/2}} = \frac{q}{\varphi H^{3/2}},$$

по которой в табл. 23.1 получаем значение относительной высоты поднятия затвора a/H , а затем и высоты подъема затвора a .

Плоские вертикальные и наклонные затворы (рис. 23.2). При истечении из-под плоских наклонных, плоских вертикальных со скругленной низовой кромкой (рис. 23.2, а) или криволинейных затворов, расположенных над дном без порога, справедливы формулы (23.3) — (23.5) для расхода и средней скорости.

Значения расчетных коэффициентов для этих затворов, в основном коэффициента вертикального сжатия, а также коэффициента расхода, отличаются от аналогичных значений коэффициентов для плоского вертикального затвора с острой низовой кромкой.

При наклоне напорной грани затвора в сторону верхнего бьефа (рис. 23.2, в) условия истечения становятся более благоприятными, сжатие струи уменьшается (коэффициент ε растет) и увеличивается

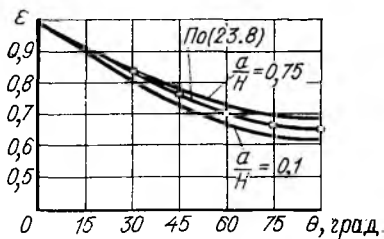


Рис. 23.3

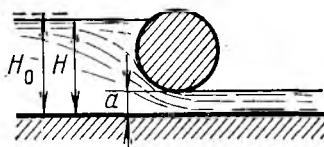


Рис. 23.4

коэффициент расхода μ . В зависимости от угла наклона θ к горизонту касательной к низовой кромке, из-под которой происходит истечение, и относительного открытия a/H значения ε при $\theta = 0 \div 90^\circ$ могут быть при отсутствии бокового сжатия определены по формуле, предложенной К. Ф. Химицким,

$$\varepsilon = \frac{1}{1 + \sqrt{0,4 \sin^3 \theta [1 - (a/H)^2]}} \quad (23.7)$$

При боковом сжатии на входе вместо a/H в знаменателе подставляется отношение площади отверстия в свету к площади живого сечения перед отверстием в верхнем бьефе $\omega_{\text{отв}}/\omega_{\text{в. б.}}$.

Проследим по графику на рис. 23.3, как изменяются коэффициенты ε при различных $\theta \leq 90^\circ$ и a/H . При увеличении θ (т. е. по мере приближения к вертикальному положению затвора) крайние значения (при $a/H = 0,1$ и $0,75$) ε значительно отличаются друг от друга. Для приближенных расчетов можно принимать для каждого из a/H и $\theta \leq 90^\circ$ осредненные значения ε из полученных по (23.7). Для определения осредненных значений можно пользоваться формулой

$$\varepsilon = \frac{1}{1 + 0,53 \sin^3 \theta} \quad (23.8)$$

При наклоне напорной грани затвора в сторону нижнего бьефа (рис. 23.2, г, $\theta > 90^\circ$) коэффициент вертикального сжатия уменьшается, уменьшается и коэффициент расхода.

Плоские затворы со скругленной низовой кромкой (рис. 23.2, а, б). Скругление низовой кромки затвора приводит к увеличению ε и μ . В результате исследований плавно обтекаемых затворов со скругленной нижней частью затвора, а также затворов с нижним козырьком, очерченным по форме сжатой струи, вытекающей из-под плоского вертикального затвора, были получены довольно высокие значения коэффициента расхода ($\mu = 0,9 \div 0,97$).

При истечении из-под плавно обтекаемых затворов можно принимать при соответствующем назначении радиуса скругления $\varepsilon \approx 1,0$, т. е. считать, что струя вытекает практически без сжатия в вертикальной плоскости. Так, например, при истечении из-под

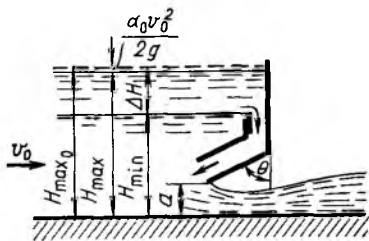


Рис. 23.5

вертикального затвора с нижней частью, выполненной в виде четверти круга радиусом r (рис. 23.2, б), сжатие потока на выходе практически отсутствует, т. е. $\epsilon = 1$ при $a/r \leq 1,0$. Такие затворы часто используют в лабораторных исследованиях и, что особенно важно, в водомерных устройствах на каналах мелиоративных систем.

Для расчетов пропускной способности таких устройств рекомендуются также высокие значения $\mu = 0,92 \div 0,95$.

Цилиндрический (вальцовый) затвор. Расположенный над плоским горизонтальным дном цилиндрический (вальцовый) затвор (рис. 23.4) также обеспечивает истечение с коэффициентом ϵ , близким к 1. Соответственно по опытным данным Д. В. Штеренлихта и В. А. Полениной при изменении a/H от 0,07 до 0,5 коэффициент расхода μ при $\epsilon \approx 1$ изменяется от 0,98 до 0,94.

Затворы — автоматические регуляторы. Автоматические регуляторы уровня воды в верхнем бьефе представляют собой водосливы или затворы-автоматы. Через водослив или под затвором (или под ним и над ним одновременно) сбрасывается излишний расход, благодаря чему уровень (заданный или расчетный) поддерживается постоянным.

Рассмотрим стабилизатор расхода типа «телескопический коробчатый затвор» (рис. 23.5), предложенный Я. В. Бочкаревым.

Независимо от изменения в определенных пределах расхода и уровня воды в верхнем бьефе стабилизатор обеспечивает поступление в отводящий канал постоянного расхода.

Как и для обычного затвора, по (23.5)

$$Q = \mu ab \sqrt{2g(H_0 - \epsilon a)}.$$

Для поддержания постоянного расхода необходимо, чтобы при заранее заданном диапазоне изменения уровня воды в верхнем бьефе было постоянным произведение

$$\mu \sqrt{2g(H_0 - \epsilon a)} = \text{const},$$

что достигается изменением сопротивлений и коэффициента вертикального сжатия, коэффициента расхода при изменении действующего напора. Переливающаяся через вертикальную, заделанную в боковые устои (или быки) сооруженную стенку вода попадает во внутреннюю полость затвора, откуда выходит навстречу основному потоку, что создает дополнительные сопротивления. Изменение открития затвора приводит к изменению расхода.

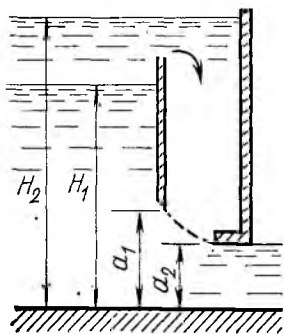


Рис. 23.6

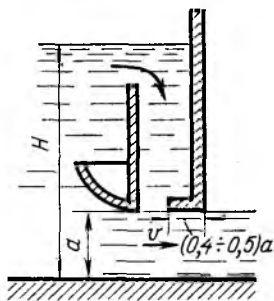


Рис. 23.7

Далее формула (23.4) преобразуется к виду

$$Q = \varphi \varepsilon \frac{a}{H_0} b \sqrt{2g \left(1 - \frac{\varepsilon a}{H_0}\right)} H_0^{3/2} = \varphi \tau_c \sqrt{1 - \tau_c} b \sqrt{2g} H_0^{3/2} = m_{к.з} b \sqrt{2g} H_0^{3/2},$$

так как $\varepsilon a / H_0 = h_c / H_0 = \tau_c$.

Коэффициент расхода коробчатого затвора $m_{к.з}$ определяется по эмпирическим зависимостям, учитывающим конструктивные особенности, условия истечения, в частности угол наклона θ .

Расчетный напор $H_{расч}$ принимается равным H_{min} , а $a = a_{max} = 0,35 H_{расч}$; допустимое значение колебания уровней над верхом неподвижной стенки $\Delta H = 0,45 H_{расч}$.

Для автоматизации водораспределения на мелиоративных системах применяются и другие конструкции затворов — стабилизаторов расхода, например коробчатые затворы (рис. 23.6), в которых истечение происходит из-под передней стенки (при напорах H_1), а затем при увеличении расхода вода переливается через переднюю стенку, заполняет пространство между передней и задней стенками и истечение происходит из-под второй стенки при меньшем открытии a_2 . С увеличением напора до максимально допустимого H_2 расход увеличивается до расхода, проходившего до перелива через вертикальную переднюю стенку,

$$Q = \varphi \varepsilon_2 a_2 b \sqrt{2g (H_2 - \varepsilon_2 a_2)}.$$

В конструкции затвора — стабилизатора расхода, приведенного на рис. 23.7, козырек, выполненный по форме кривой свободной поверхности, прикрепляется к нижней кромке передней стенки, а к задней стенке крепится горизонтальный козырек длиной $(0,4 \div 0,5) a$. Нижние кромки криволинейного и горизонтального козырьков находятся на одной отметке. Благодаря криволинейности

нижнего контура такого коробчатого затвора при рекомендуемых конструктивных параметрах коэффициент расхода μ равен 0,95.

При истечении из-под затворов важное практическое значение имеют расчеты сил и моментов, действующих на затвор. Воздействия при истечении называют *гидродинамическими* в отличие от гидростатических. Действительно, при истечении силы, действующие на затвор, и распределение давлений по поверхности затвора отличаются от аналогичных величин в условиях гидростатики.

При расчетах надо учитывать возможность появления опасных колебаний затворов¹.

Сегментные затворы. При автоматизированном измерении расходов воды в каналах мелиоративных систем при истечении из-под сегментных затворов, установленных над дном без порога (рис. 23.2, *д*), в отверстиях с прямоугольным поперечным сечением расход определяется по формуле

$$Q = \left[0,4 \left(\frac{c-a}{R} \right)^2 + 0,5 \right] ab \sqrt{2g(H-0,7a)},$$

где R — радиус сегментного затвора; c — высота расположения оси сегментного затвора (рекомендуется применять $c/R = 0,4 \div 0,9$; $a/H = 0,05 \div 0,5$; $a/R = 0,03 \div 0,33$). В формуле принято осредненное значение $\varepsilon = 0,7$.

23.3. Несвободное истечение из-под затворов

При несвободном истечении гидравлический прыжок надвинут на сооружение ($h_6 > h_c'$) и является затопленным. В сжатом сечении образуется глубина h_z (рис. 23.8), причем $h_c < h_z < h_6$. Для определения расхода, протекающего под затвором, применим уравнение Бернулли для сечения 1—1 перед затвором и сечения 2—2 с глубиной h_z (что несколько условно, так как, строго говоря, движение в сечении 2—2 отличается от плавно изменяющегося). Здесь полагаем, что распределение давлений по глубине в сечениях 2—2 и затем 3—3 соответствует гидростатическому закону. Опыты подтверждают применимость такого допущения.

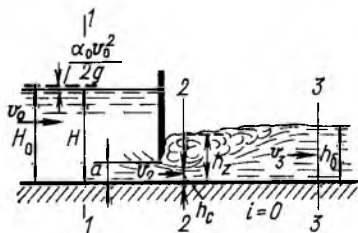


Рис. 23.8

¹ Для определения воздействий потока на затворы имеются специальные «Рекомендации по компоновке затворных камер и расчетам гидродинамических воздействий потока на плоские, сегментные и дисковые затворы гидротехнических сооружений». П 84—79/ВНИИГ. Л., 1980.

Тогда можно записать

$$H_0 = h_z + \frac{\alpha_c v_c^2}{2g} + \Sigma \zeta \frac{v_c^2}{2g}.$$

Учитывая, что расход проходит в транзитной части потока, характеризующейся в сечении 2—2 глубиной $h_c = \epsilon a$, получим

$$Q = \omega_c v_c = \epsilon ab \varphi \sqrt{2g(H_0 - h_z)} = \mu ab \sqrt{2g(H_0 - h_z)}, \quad (23.9)$$

где μ — коэффициент расхода; h_z — глубина в сечении 2—2.

По опытным данным значения μ при подтопленном истечении из-под затвора можно принимать такими же, как и при свободном истечении. Таким образом, зная глубину h_z , можно при остальных известных величинах определить расход Q .

Для отыскания h_z рассмотрим в прямоугольном русле (плоская задача) отсек жидкости между сечениями 2—2 и 3—3, в котором глубина становится равной бытовой глубине h_6 .

Считаем, что на этом участке уклон дна $i \approx 0$, и пренебрегаем ввиду небольшой длины отсека проекцией сил трения, тогда, применяя теорему об изменении количества движения

$$\rho \alpha' q (v_3 - v_2) = \frac{1}{2} \rho g h_z^2 - \frac{1}{2} \rho g h_6^2,$$

получим уравнение подтопленного гидравлического прыжка для прямоугольного русла в виде

$$\frac{2\alpha' q}{g} (v_3 - v_2) = h_z^2 - h_6^2, \quad (23.10)$$

где $q = Q/b$ — удельный расход; $v_2 = q/h_c$ — скорость в транзитной струе в сечении 2—2; $v_3 = q/h_6$ — скорость в сечении 3—3.

Обе части уравнения отрицательны.

Приняв значения коэффициента количества движения в обоих сечениях $\alpha' = 1$ и заменив в (23.10) скорости $v_2 = q/h_c$ и $v_3 = q/h_6$, определим h_z из следующих уравнений:

$$h_z^2 = h_6^2 - \frac{2q^2}{g} \frac{h_6 - h_c}{h_6 h_c} \quad (23.11)$$

или

$$h_z^2 = h_6^2 - 2h_{кр}^3 \frac{h_6 - h_c}{h_6 h_c}.$$

При известных q и h_6 и заданной высоте поднятия затвора a можно определить h_z (учитывая, что $h_c = \epsilon a$).

Заменив в (23.11) удельный расход q его значением из уравнения (23.9), получим

$$h_z^2 = h_6^2 - 4\mu^2 a^2 (H_0 - h_z) \frac{h_6 - h_c}{h_6 h_c}.$$

Обозначив $M = 4\mu^2 a^2 \frac{h_6 - h_c}{h_6 h_c}$, получим квадратное уравнение

$$h_z^2 + M h_z - (h_0^2 - M H_0) = 0,$$

решение которого дает искомую глубину

$$h_z = \sqrt{h_0^2 - M \left(H_0 - \frac{M}{4} \right)} + \frac{M}{2}. \quad (23.12)$$

Вычислив h_z , найдем расход Q по (23.9).

Для определения других параметров при расчете отверстий используются формулы (23.9) и (23.11). Например, при известных Q , H_0 и h_6 требуется найти высоту подъема затвора, при которой пройдет указанный расход. Тогда, записав скорость в сечении 2—2

$$v_2 = \varphi \sqrt{2g(H_0 - h_z)}$$

и подставив это выражение в (23.10), получим

$$h_z^2 + \frac{2\alpha' q}{g} \varphi \sqrt{2g(H_0 - h_z)} - h_0^2 - \frac{2\alpha' q}{g} \frac{q}{h_6} = 0,$$

а затем подбором найдем h_z .

Из (23.9) находим значение $\frac{Q}{\varphi b \sqrt{2g(H_0 - h_z)} H_0}$,

равное, очевидно, относительной сжатой глубине $\epsilon a/H_0$. Считая $H_0 \approx H$, из табл. 23.1 найдем отношение a/H_0 , которое соответствует вычисленной относительной сжатой глубине $\epsilon a/H_0$. Теперь по a/H_0 , зная H_0 , найдем a .

Коэффициент скорости φ при несвободном истечении можно принимать равным φ для случая свободного истечения.

При несвободном истечении из-под затворов в горизонтальное русло с прямоугольным живым сечением кроме (23.9) при расчетах используется также формула

$$Q = \varphi \epsilon h_6 b \sqrt{2g(H_0 - h_6)}, \quad (23.13)$$

полученная в результате применения уравнения Бернулли к сечениям 1—1 и 2—2.

Отметим, что использование формулы

$$Q = \mu a b \sqrt{2g(H_0 - h_6)}$$

не обеспечивает необходимой точности расчетов, если принимать в этом случае μ равным μ при свободном истечении. Формула (23.13) учитывает все потери на участке 1—1—3—3, в том числе и потери в гидравлическом прыжке. В связи с этим коэффициент скорости φ_6 является переменной величиной, изменяющейся в значительных пределах. Коэффициент скорости при этом зависит от отношения открытия затвора a к бытовой глубине в нижнем бьефе h_6 . По данным опытов А. С. Гинца, А. С. Иноземцева, А. В. Андреевской,

a/h_6	φ_6	a/h_6	φ_6	a/h_6	φ_6
0,05	0,035	0,45	0,380	0,85	0,90
0,10	0,070	0,50	0,445	0,90	0,95
0,15	0,105	0,55	0,515	0,95	0,98
0,20	0,145	0,60	0,60	1,00	1,00
0,25	0,185	0,65	0,685		
0,30	0,230	0,70	0,750		
0,35	0,275	0,75	0,810		
0,40	0,325	0,80	0,860		

Э. С. Бегляровой и В. В. Варламова можно φ_6 принимать по табл. 23.2.

При истечении из-под вертикального плоского затвора с острой кромкой в горизонтальный лоток прямоугольного сечения при $0,15 \leq a/h_6 \leq 0,5$ коэффициент скорости

$$\varphi_6 = 0,933a/h_6 - 0,04.$$

При использовании автоматизированных систем управления водораспределением необходимо одновременно измерять отметки воды в верхнем и нижнем бьефах (определяются напор и бытовая глубина ниже сооружения) для нахождения объема накопления или сработки воды в бьефах. При этом расчетная формула для расхода имеет вид

$$Q = \varphi_6 \omega_6 \sqrt{2g(H - h_6 + il)}, \quad (23.14)$$

где ω_6 — площадь живого сечения в створе, где находится h_6 ; l — расстояние между створами, где определяются H и h_6 ; i — уклон дна на участке l .

По градуировочным измерениям сооружения сначала должны быть установлены зависимости (графики) $\varphi_6 = f(a/h_6)$ и $\omega_6 = f(h_6)$. Затем можно использовать и зависимость (23.14). В (23.14) учитывается приращение il , так как рекомендуемое в нормативах расстояние между створами измерения H и h_6 довольно значительно.

При несвободном истечении из-под сегментного затвора в горизонтальный канал (русло) (рис. 23.9) расход может быть определен по (23.9), а коэффициент скорости φ принят равным 0,99.

Для этого случая расход может быть вычислен также по (23.13).

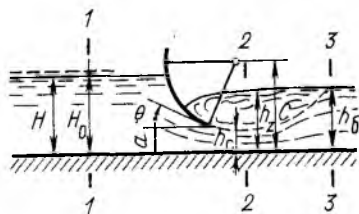


Рис. 23.9

Как и ранее, коэффициент φ_6 учитывает потери энергии при движении воды между сечениями 1—1 и 3—3 и по данным И. П. Мартынова и М. М. Мартыновой зависит от относительного открытия a/H_0 .

23.4. Истечение из-под затворов на гребне водослива практического профиля

Во многих случаях происходит истечение из-под затворов, установленных над водосливом практического профиля, гребень которого очерчен по форме свободной струи, переливающейся через водослив с острым ребром. Будем считать, что вода, переливаясь через водослив, не отрывается от его гребня, кроме того, на гребне нет зон с пониженным давлением (нет вакуума).

Свободное истечение из-под вертикального плоского затвора с острой низовой кромкой при отсутствии бокового сжатия (рис. 23.10). Струя после прохождения через отверстие испытывает вертикальное сжатие; сжатая глубина $h_c \approx \varepsilon a$; жидкость в сечении 1—1 находится под атмосферным давлением; напор над гребнем водослива H соответственно $H_0 = H + \alpha_0 v_0^2 / (2g)$.

Выделим горизонтальную площадку в пределах сечения 1—1 высотой dz , находящуюся на расстоянии z , считая по вертикали от уровня в верхнем бьефе. Тогда расход можно определить следующим образом:

$$Q = \int_{H_0 - \varepsilon a}^{H_0} \varphi \sqrt{2gz} b dz.$$

Приняв $\varphi = \text{const}$, после интегрирования с учетом указанных пределов получим

$$Q = \frac{2}{3} \varphi b \sqrt{2g} [H_0^{3/2} - (H_0 - \varepsilon a)^{3/2}]. \quad (23.15)$$

Преобразуем (23.15), для чего вынесем $H_0^{3/2}$ за скобки:

$$Q = \frac{2}{3} \varphi \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon a}{H_0} \right)^{3/2} \right] b \sqrt{2g} H_0^{3/2}.$$

Разложим $(1 - \varepsilon a / H_0)^{3/2}$ в ряд

$$\left(1 - \frac{\varepsilon a}{H_0} \right)^{3/2} \cong 1 - \frac{3}{2} \frac{\varepsilon a}{H_0} + \frac{3}{8} \left(\frac{\varepsilon a}{H_0} \right)^2.$$

Ограничившись двумя членами ряда, получим

$$Q = \varphi \varepsilon \frac{a}{H_0} b \sqrt{2g} H_0^{3/2} = \mu \frac{a}{H_0} b \sqrt{2g} H_0^{3/2}$$

или

$$Q = \varphi \varepsilon a b \sqrt{2g H_0} = \mu a b \sqrt{2g H_0}. \quad (23.16)$$

Таким образом, получили формулу расхода такой же структуры, как и формула расхода при истечении из отверстий. Они различаются только значениями коэффициентов μ . Для рассматриваемых условий необходимо знать φ , ϵ или μ .

Для истечения из-под затвора, установленного над водосливом практического профиля, $\varphi=0,95$. Значения ϵ приближенно можно принимать по табл. 23.1, но более правильно использовать значения μ , найденные экспериментально для рассматриваемого случая истечения применительно к (23.16).

Исследования, выполненные И. П. Мартыновым при $a/H = 0,1 \div 0,75$ и $H_B/H_{пр} = 0,6 \div 1,17$, показали, что μ растет с увеличением $H_B/H_{пр}$ при постоянном a/H и уменьшается с увеличением a/H при постоянном $H_B/H_{пр}$ (здесь $H_{пр}$ — профилирующий напор, на который рассчитан профиль водослива, а H_B — напор, при котором заданный расход проходил бы через данный водослив без затвора). В указанном диапазоне коэффициент расхода μ изменяется от 0,556 до 0,685 (табл. 23.3).

Свободное истечение из-под сегментного затвора, установленного на гребне водослива практического профиля (рис. 23.11, а, б).

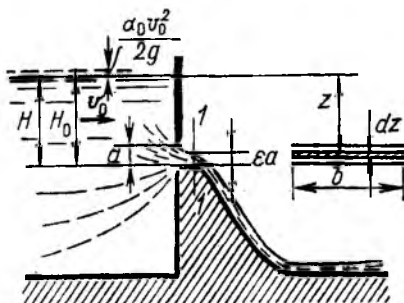


Рис. 23.10

Таблица 23.3

$\frac{a}{H}$	μ				$\mu \frac{a}{H}$			
	$\frac{H_B=0,6}{H_{пр}}$	$\frac{H_B=0,8}{H_{пр}}$	$\frac{H_B=1}{H_{пр}}$	$\frac{H_B=1,17}{H_{пр}}$	$\frac{H_B=0,6}{H_{пр}}$	$\frac{H_B=0,8}{H_{пр}}$	$\frac{H_B=1}{H_{пр}}$	$\frac{H_B=1,17}{H_{пр}}$
0,10	0,646	0,666	0,673	0,685	0,0646	0,0666	0,0673	0,0685
0,15	0,640	0,659	0,666	0,680	0,096	0,099	0,100	0,102
0,20	0,632	0,651	0,658	0,672	0,126	0,130	0,132	0,134
0,25	0,625	0,644	0,652	0,665	0,156	0,161	0,163	0,166
0,30	0,619	0,637	0,645	0,659	0,185	0,190	0,193	0,198
0,35	0,612	0,630	0,637	0,652	0,214	0,220	0,223	0,228
0,40	0,605	0,623	0,630	0,645	0,242	0,249	0,252	0,258
0,45	0,598	0,615	0,623	0,638	0,269	0,277	0,280	0,287
0,50	0,591	0,607	0,615	0,631	0,295	0,304	0,307	0,315
0,55	0,584	0,600	0,608	0,624	0,321	0,329	0,334	0,343
0,60	0,577	0,593	0,601	0,617	0,346	0,356	0,360	0,370
0,65	0,570	0,586	0,593	0,610	0,370	0,380	0,385	0,396
0,70	0,563	0,579	0,587	0,603	0,394	0,405	0,419	0,422
0,75	0,556	0,571	—	—	0,417	0,427	0,434	0,447

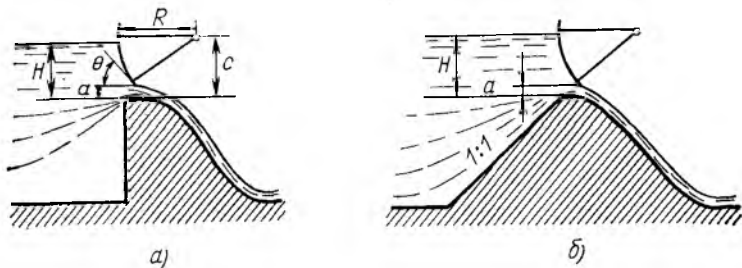


Рис. 23.11

За расчетную формулу расхода принимается (23.16). Коэффициент расхода рекомендуется принимать по эмпирическим формулам или по экспериментальным данным.

23.5. Контрольные вопросы и примеры

1. Изобразите схемы для различных случаев истечения из-под затворов.
2. Какие основные линейные параметры влияют на явление истечения из-под затвора?
3. Что такое сжатая глубина и коэффициент вертикального сжатия? От чего зависит коэффициент вертикального сжатия? Назовите численные пределы, в которых изменяется данный коэффициент.
4. Каковы условия, при которых истечение из-под затвора будет свободным (неподтопленным)? Когда, при каких условиях истечение из-под затвора будет подтопленным, несвободным? Приведите формулу, по которой можно определить, является ли истечение свободным или подтопленным. Выведите формулу для расхода из-под затвора при свободном истечении.
5. Какие численные значения коэффициентов вы можете указать для рассматриваемого случая?
6. Как используется предложенная И. И. Агроскиным методика расчета сжатых глубин по относительной сжатой глубине?
7. Как найти высоту подъема затвора, необходимую для пропуска заданного расхода?
8. Влияет ли наклон затвора на условия истечения? Каким именно образом? Приведите формулу.
9. В чем особенности истечения из-под криволинейных затворов (с точки зрения вертикального сжатия) и из-под затворов со скругленной нижней кромкой (для плоских затворов)?
10. Каковы особенности истечения из-под затворов (подтопленного, несвободного)? Какие предпосылки мы принимаем при применении теоремы об изменении количества движения в этом случае? Дайте вывод уравнения расхода для несвободного истечения из-под затвора и для глубины, образующейся непосредственно за затвором.
11. Как найти высоту поднятия затвора для пропуска заданного расхода в условиях несвободного истечения?
12. Как определяется расход при подтопленном истечении из-под затвора, если его находить с использованием в формуле бытовой глубины в нижнем бьефе? Каковы особенности этой формулы, а также ее применения и коэффициента скорости в данном случае?
13. Каковы особенности определения расхода при истечении из-под затвора при учете перепада отметок дна на участке между водомерными постами в верхнем и нижнем бьефах?

14. Выведите формулу для расхода при свободном истечении из-под вертикального плоского затвора с острой низовой кромкой при отсутствии бокового сжатия, при установке затвора на гребне водослива практического профиля криволинейного очертания. В каких формах можно представить указанное уравнение для расхода?

15. В чем заключаются особенности коэффициентов расхода в данном случае истечения?

Пример 23.1. Определить расход при истечении из-под плоского вертикального затвора, перекрывающего водосбросное отверстие в канале с прямоугольным поперечным сечением. Ширина отверстия $b = 5$ м; напор (постоянный, т. е. не изменяющийся во времени в условиях данной задачи) $H = 3$ м. Высота поднятия затвора $a = 0,6$ м. Уклон дна отводящего участка $i = 0$ (истечение по схеме на рис. 23.1, а). Бытовая глубина в отводящем русле $h_6 = 1,6$ м.

Решение. Вначале определим, каким будет истечение из-под затвора (свободным или несвободным). Так как уклон дна отводящего участка $i = 0 < i_{кр}$, то необходимо рассмотреть, выполняется ли неравенство (23.6). В случае, если условие (23.6) выполняется, то истечение из-под затвора в данных условиях будет свободным.

Находим сжатую глубину по (23.1), определив предварительно значение коэффициента вертикального сжатия ε по табл. 23.1 при $a/H = 0,2$. Имеем $\varepsilon = 0,62$. Тогда $h_c = \varepsilon a = 0,62 \cdot 0,6 = 0,372$ м.

Далее обращаемся к условию (23.6):

$$\frac{h_6}{h_c} \left(\frac{h_6}{h_c} + 1 \right) < 4\varphi^2 \left(\frac{H_0}{h_c} - 1 \right).$$

Полагая $H_0 \approx H$ и принимая $\varphi = 0,95$ (см. § 23.2), имеем $\frac{1,6}{0,372} \left(\frac{1,6}{0,372} + 1 \right) = 22,79 < 4 \cdot 0,95^2 \left(\frac{3}{0,372} - 1 \right) = 25,5$, т. е. истечение из-под затвора — свободное.

Определим расход по (23.4) при $H_0 \approx H$; $\varphi = 0,95$; $\varepsilon = 0,62$:

$$Q = \varphi \varepsilon a b \sqrt{2g(H - \varepsilon a)} = 0,95 \cdot 0,62 \cdot 0,6 \cdot 5 \cdot 4,43 (3 - 0,372) = 12,69 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Найдем скорость подхода $V_0 = \frac{Q}{bH} = \frac{12,69}{5,3} = 0,846 \text{ м/с} = 0,85 \text{ м/с}$.

Тогда, приняв $\alpha_0 = 1,1$, получим напор с учетом скорости подхода $H_0 = H + \frac{\alpha_0 V_0^2}{2g} = 3 + \frac{1,1 \cdot 0,85^2}{19,62} = 3,04$ м. Уточняем значение расхода:

$$Q = 0,96 \cdot 0,62 \cdot 0,6 \cdot 5 \cdot 4,43 \sqrt{3,04 - 0,372} = 12,79 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Различие в значениях расхода без учета скоростного напора на подходе и с учетом этого составляет 0,78 %. Принимаем $Q = 12,79 \text{ м}^3/\text{с}$. Если расхождение результатов было бы большим (например, более 2 %), расчет следовало бы повторить.

Вид истечения (свободное или несвободное) можно определить также с использованием способа, предложенного И. И. Агроскиным.

Из табл. 23.1, приняв $H_0 \approx H$, имеем при $a/H = 0,2$ значение $\Phi(\tau_c) = 0,514$ и $\tau_c = 0,124$. Так как $\tau_c = \varepsilon \frac{a}{H}$, то в данном случае $h_c = \varepsilon a = \tau_c H = 0,372$ м, что, естественно, совпадает с ранее полученным результатом.

Далее (см. § 22.11) по табл. П.22.7 находим относительную вторую сопряженную (со сжатой глубиной) глубину τ_c'' [при $\Phi(\tau_c) = 0,514$ и $\varphi = 0,95$], равную $\tau_c'' = 0,556$. Тогда $h_c'' = \tau_c'' H = 0,556 \cdot 3 = 1,67$ м.

Таким образом, $h'_c = 1,67 \text{ м} > h_6 = 1,6 \text{ м}$ и истечение из-под затвора свободное. Далее расчет проводится, как указано выше.

Пример 23.2. Определить высоту поднятия плоского вертикального затвора, установленного в начале водослива с широким порогом (схема на рис. 23.1, а, входное ребро — нескругленное). Поперечное сечение водосбросного отверстия — прямоугольное, расход $Q = 10 \text{ м}^3/\text{с}$; напор $H = 2,5 \text{ м}$; ширина перекрываемого пролета $b = 6 \text{ м}$. Высота порога водослива $p_1 = p = 2 \text{ м}$; бытовая глубина $h_6 = 2,8 \text{ м}$.

Решение. Найдем высоту поднятия затвора с использованием табл. 23.1. Полагая, что истечение из-под затвора свободное, и приняв $H \approx H_0$ и $\varphi = 0,85$ (см. П.23.2), имеем [см. (22.32)] при $q = \frac{Q}{b} = 1,667 \text{ м}^3/\text{с/м}$

$$\Phi(\tau_c) = \frac{q}{\varphi E_0^{3/2}} = \frac{1,667}{0,85 \cdot 2,5^{3/2}} = 0,496.$$

Находим по табл. 23.1 (интерполируя) $\frac{a}{H} = 0,193$ и $\tau_c = 0,1195$. Тогда $a = 0,193 \cdot H = 0,193 \cdot 2,5 = 0,48 \text{ м}$. Для проверки предположения о том, что истечение из-под затвора — свободное, найдем значение второй сопряженной глубины на пороге (индекс «пор») $h'_{c, \text{пор}}$ (см. § 22.11).

По табл. П.22.7 при $\varphi = 0,85$ и $\Phi(\tau_c) = 0,496$ имеем $\tau'_c = 0,49$. Тогда $h'_{c, \text{пор}} = 0,49 H = 0,49 \cdot 2,5 = 1,22 \text{ м}$. Так как $p + h'_{c, \text{пор}} > h_6$, то истечение из-под затвора действительно будет свободным. Расчет не требуется уточнять.

Пример 23.3. Определить расход, вытекающий из-под плоского вертикального затвора, перекрывающего прямоугольное отверстие без порога (схема на рис. 23.1, а), уклон дна $i = 0$. Напор $H = 3,5 \text{ м}$; высота поднятия затвора $a = 0,9 \text{ м}$; ширина отверстия $b = 7 \text{ м}$; бытовая глубина в отводящем русле $h_6 = 2,8 \text{ м}$.

Определим, каким будет истечение (свободным или несвободным). Для этого найдем вначале значение глубины в сжатом сечении. По табл. 23.1 при $\frac{a}{H} = \frac{0,9}{3,5} = 0,257$ имеем $\varepsilon = 0,6224$. Приняв $\varepsilon = 0,622$, получим $h_c = \varepsilon a = 0,622 \cdot 0,9 = 0,56 \text{ м}$. Проанализируем условия истечения, рассмотрев неравенство (23.6), где примем $\varphi = 0,97$ (см. П.23.2). Допуская, что $H_0 \approx H$, имеем

$$\frac{h_6}{h_c} \left(\frac{h_6}{h_c} + 1 \right) = \frac{2,8}{0,56} \left(\frac{2,8}{0,56} + 1 \right) = 30$$

и

$$4\varphi^2 \left(\frac{H_0}{h_c} - 1 \right) = 4 \cdot 0,97^2 \left(\frac{3,5}{0,56} - 1 \right) = 19,76.$$

Очевидно, что неравенство (23.6) не выполняется. Следовательно, истечение несвободное и расход определяем по (23.9).

Вновь отметим, что характер истечения можно было определить, сравнивая h'_c и h_6 . При $E_0 = H_0 \approx H$ имеем $\tau_c = \frac{h_c}{H} = 0,160$. Из табл. П.22.7 при $\varphi = 0,97$, интерполируя, получим $\tau'_c = 0,628$. Тогда $h'_c = \tau'_c E_0 \approx \tau'_c H = 2,2 \text{ м}$. Так как $h'_c = 2,2 \text{ м} < h_6 = 2,8 \text{ м}$, то сопряжение произойдет с надвинутым гидравлическим прыжком. Истечение из-под затвора будет несвободным.

Для определения значения расхода предварительно найдем глубину h_z по (23.12). При этом $\mu = \epsilon\varphi = 0,622 \cdot 0,97 = 0,603$ и $M = 4\mu^2 a^2 \frac{h_6 - h_c}{h_6 h_c} = 1,683$ м. Тогда по (23.12) при $H_0 \approx H$

$$h_z = \sqrt{h_6^2 - M \left(H_0 - \frac{M}{4} \right)} + \frac{M}{2} = \\ = \sqrt{2,8^2 + 1,683 (3,5 - 0,25 \cdot 1,683)} + 0,5 \cdot 1,683 = 2,47 \text{ м.}$$

Согласно (23.9) значение расхода равно $Q = \mu ab \sqrt{2g (H_0 - h_z)}$. При $H_0 \approx H$ имеем $Q = 0,603 \cdot 0,9 \cdot 7 \cdot \sqrt{4,43 (3,5 - 2,47)} = 17,08 \text{ м}^3/\text{с}$.

Уточним, как влияет допущение о примерном равенстве H и H_0 на результаты.

Найдем скорость подхода $V_0 = \frac{Q}{bH} = \frac{17,08}{7 \cdot 3,5} = 0,7 \text{ м/с}$. Принимая $\alpha_0 = 1,1$, получаем, что скоростной напор равен

$$\frac{\alpha_0 V_0^2}{2g} = \frac{1,1 \cdot 0,7^2}{19,62} = 0,027 \text{ м}$$

и напор с учетом скорости подхода

$$H_0 = H + \frac{\alpha_0 V_0^2}{2g} = 3,5 + 0,027 = 3,527 \text{ м.}$$

Уточненное значение глубины

$$h_z = \sqrt{2,8^2 - 1,683 (3,527 - 0,25 \cdot 1,683)} + 0,5 \cdot 1,683 = 2,457 \text{ м.}$$

Отметим, что h_z при расчете по H_0 меньше, чем h_z при расчете по H (при прочих равных условиях).

Уточненное значение расхода равно

$$Q = \mu ab \sqrt{2g (H_0 - h_z)} = 0,603 \cdot 0,9 \cdot 7 \cdot 4,43 \sqrt{(3,527 - 2,457)} = 17,41 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Расхождение в значениях расхода равно 1,9 %, что можно считать допустимым. Принимаем окончательно $Q = 17,41 \text{ м}^3/\text{с}$.

Глава 24

РАСЧЕТЫ СОПРЯЖЕНИЯ БЬЕФОВ

24.1. Возможные схемы и режимы сопряжения бьефов

При движении через водослив (рис. 24.1) или при истечении из-под затвора (рис. 24.2), в том числе расположенного над гребнем водослива (рис. 24.3), можно выделить три режима сопряжения поступающей в нижний бьеф струи с потоком в нижнем бьефе: