

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:



Рис. 24.1

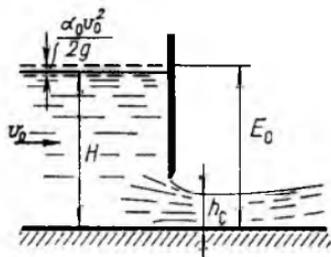


Рис. 24.2

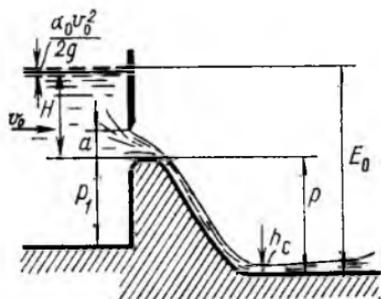


Рис. 24.3

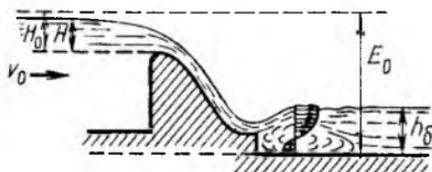


Рис. 24.4

1) д о н н ы й, при котором транзитная часть потока (транзитная струя) устойчиво примыкает к дну и, следовательно, распределение осредненных скоростей по вертикали такое, что наибольшие скорости располагаются вблизи дна (рис. 24.1);

2) п о в е р х н о с т н ы й, при котором транзитная струя располагается на поверхности или вблизи нее. Наибольшие осредненные скорости при этом приближены к поверхности. Такой режим наблюдается, например, за сооружением с низовым вертикальным уступом (рис. 24.4);

3) с м е ш а н н ы й п о в е р х н о с т н о - д о н н ы й, при котором транзитная струя вблизи сооружения находится на поверхности, а ниже по течению устойчиво примыкает к дну. Имеется несколько разновидностей смешанных режимов (рис. 24.5).

Помимо сопряжения одной из форм гидравлического прыжка реализуются схемы в виде отброса струи (рис. 24.6, а) или ее свободного падения (рис. 24.6, б) и в виде соударяющихся в воздухе (рис. 24.7) или в воде струй. В практике встречаются и другие схемы сопряжения.

Наиболее часто применяется сопряжение бьефов с донным режимом.



Рис. 24.5

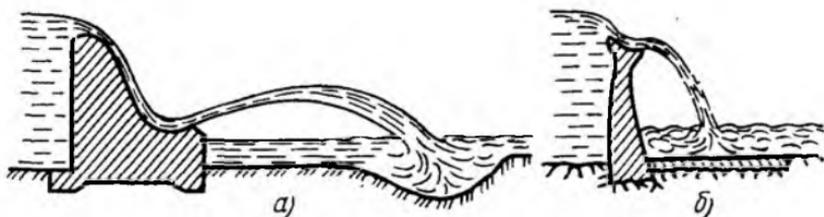


Рис. 24.6

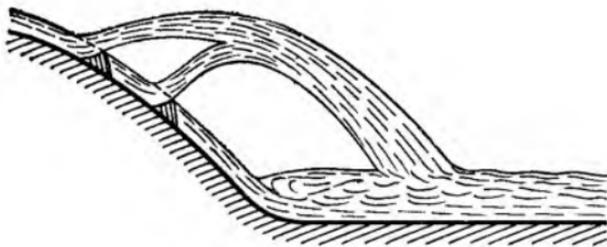


Рис. 24.7

24.2. Донный режим сопряжения

Рассмотрим этот режим на примере криволинейного водослива практического профиля. Глубина в отводящем русле в бытовых условиях h_6 при известном расходе известна.

Будем считать, что на участке сопряжения русло в нижнем бьефе достаточно широкое, чтобы движение можно было считать плоским. Уклон дна отводящего русла задан. Условимся, что $i_{отв} > 0$, тогда глубина равномерного движения в нижнем бьефе при бытовых условиях h_0 и будет глубиной h_6 . Если уклон отводящего русла $i \leq 0$, движение в нижнем бьефе неравномерное.

Непосредственно за водосливом в сжатом сечении с глубиной h_c перелившийся поток находится в бурном состоянии, т. е. $h_c < h_{кр}$, $П_{к.с} > 1$. За водосливом при этом возможны два основных случая:

- 1) в бытовых условиях при уклоне дна отводящего русла $i > i_{кр}$ поток (рис. 24.8) находится в бурном состоянии ($h_0 = h_6 > h_{кр}$);
- 2) в бытовых условиях при уклоне дна отводящего русла $i < i_{кр}$ поток (рис. 24.9) находится в спокойном состоянии ($h_0 = h_6 > h_{кр}$).

В первом случае, поскольку поток в сечении $c-c$ (при глубине h_c) и в отводящем русле находится в бурном состоянии, сопряжение будет происходить в виде плавной кривой подпора типа

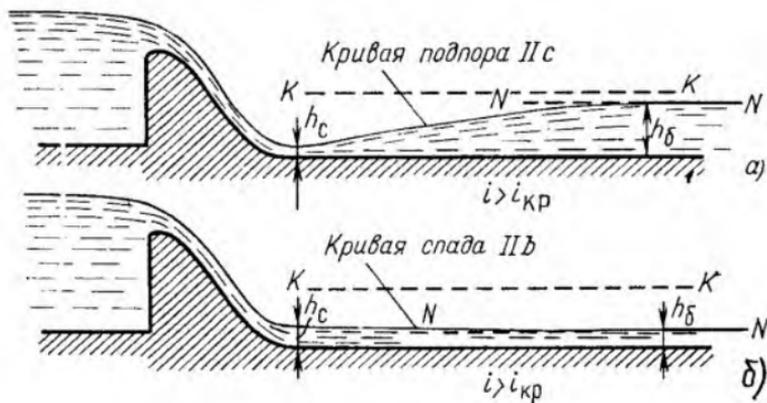


Рис. 24.8

Если глубина в нижнем бьефе h_6 и глубина h'_c равны, гидравлический прыжок начинается в сжатом сечении (рис. 24.9, а). Тогда удельная энергия потока в сжатом сечении E_c превышает удельную энергию потока в отводящем русле $E_{отв}$ точно на потери удельной энергии в гидравлическом прыжке $\Delta E_{пр}$, т. е. $E_c - \Delta E_{пр} = E_{отв}$.

Если глубина h'_c окажется больше, чем глубина в нижнем бьефе h_6 , гидравлический прыжок будет отогнанным (рис. 24.9, б) и начнется в том сечении, где глубина равна глубине h'_c , являющейся первой сопряженной глубиной для глубины h_6 . Отгон гидравлического прыжка происходит потому, что удельная энергия потока в сжатом сечении E_c в данных условиях оказывается больше, чем $E_{отв}$, не только на потери удельной энергии в прыжке $\Delta E_{пр}$, но и на некоторую часть удельной энергии $\Delta_2 E$, т. е. $E_c - \Delta E_{пр} - \Delta_2 E = E_{отв}$. Часть удельной энергии потока $\Delta_2 E$ затрачивается на преодоление сопротивлений по длине движения потока в бурном состоянии в пределах кривой подпора от сжатого сечения до сечения 1—1 (с глубиной h'_c), т. е. на длине отгона гидравлического прыжка $l_{отг}$. Чем больше значение $\Delta_2 E$, тем больше длина кривой подпора на участке отгона гидравлического прыжка. Разность удельной энергии в сечении с глубиной h'_c и удельной энергии в отводящем русле в сечении 2—2 ($E_{отв}$) равняется потерям удельной энергии в гидравлическом прыжке $\Delta E_{пр}$. Длина отгона гидравлического прыжка — длина кривой подпора l_c (при $i_{кр} > l_{отв} > 0$), типа c_0 (при $i = 0$) или типа c' (при $i < 0$) — определяется по одному из известных способов (см. гл. 17).

Если $h'_c < h_6$, гидравлический прыжок будет надвинутым (рис. 24.9, в). При этом отношение $\eta_{зт} = h_6/h'_c$ называется степенью затопления прыжка. При сопряжении в форме надвинутого (затопленного) гидравлического прыжка водослив может быть подтоплен (см. гл. 22).

24.3. Поверхностный режим сопряжения с потоком в нижнем бьефе за водосливами с вертикальным уступом

Предельные режимы. При рассмотрении сопряжения с нижним бьефом потока, переливающегося через водослив практического профиля с вертикальным низовым уступом (рис. 24.4), условно различают высокий уступ, низовая (сливная) кромка которого всегда выше максимального уровня воды в нижнем бьефе, и низкий уступ, сливная поверхность которого заглублена под уровень воды в нижнем бьефе.

Рассмотрим сначала сопряжение с потоком в нижнем бьефе за водосливами с низким уступом. В нижнем бьефе поток находится в спокойном состоянии, т. е. $h_6 > h_{кр}$. Форма сопряжения в нижнем бьефе при данных условиях (расход, высота водослива, высота уступа и угол наклона его носка θ_n , принимаемый в пределах от 0 примерно до 12—15°), будет зависеть от бытовой глубины h_6 .

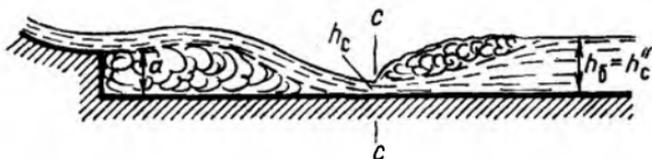


Рис. 24.10

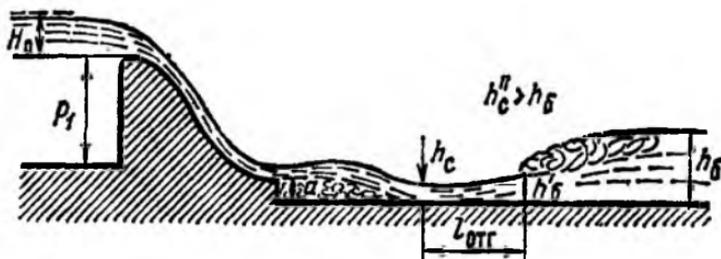


Рис. 24.11

При определенном соотношении образующейся за уступом сжатой глубины h_c и сопряженной с ней h_c' может произойти гидравлический прыжок в сжатом сечении ($h_c' = h_0$, рис. 24.10), отогнанный гидравлический прыжок ($h_c'' > h_0$, рис. 24.11) или надвинутый гидравлический прыжок ($h_c' < h_0$).

Рассмотрим кратко основные особенности сопряжения с поверхностным и смешанным (поверхностно-донным) режимами.

При увеличении глубины в нижнем бьефе донный режим сопряжения сменяется поверхностным режимом с незатопленным поверхностным прыжком или с незатопленной струей (см. рис. 24.5). Поверхностного водоворота (вальца) при этом нет, транзитная струя располагается на поверхности воды в нижнем бьефе; к уступу примыкает один донный валец; максимальные скорости сосредоточены вблизи свободной поверхности.

Смена различных форм сопряжения происходит при различных так называемых критических режимах, которые характеризуются различными граничными глубинами в нижнем бьефе (такие глубины также называют критическими, или предельными).

Так, смена донного режима поверхностным с незатопленным гидравлическим прыжком происходит при глубине в нижнем бьефе $h_{0, пр1}$, которая называется первой предельной глубиной за водосливом с уступом.

При глубине в нижнем бьефе, большей $h_{0, пр1}$, появляется поверхностный валец на уступе, т. е. сопряжение переходит в форму поверхностного режима с затопленной струей, при этом имеется и донный, и поверхностный валец (рис. 24.5). Поверхностный режим сопряжения в этом случае устойчиво существует на всей длине участка сопряжения в нижнем бьефе.

Граница между поверхностными режимами с незатопленной и затопленной струями называется в т о р ы м к р и т и ч е с к и м р е ж и м о м, ему соответствует вторая предельная глубина в отводящем русле $h_{б. пр2}$.

Третья предельная глубина $h_{б. пр3}$ разделяет поверхностный режим с затопленной струей и незатопленный поверхностно-донный режим (рис. 24.5), при котором вблизи сооружения — поверхностный режим сопряжения, а далее транзитная струя проходит вблизи дна, т. е. наблюдается донный режим сопряжения.

Затем при увеличении глубины в отводящем русле свыше $h_{б. пр4}$ указанная форма сопряжения смешанного типа может перейти в форму так называемого восстановленного донного прыжка. При этом вновь наблюдается донный режим сопряжения (см. рис. 24.5). За уступом располагается сравнительно небольшой донный валец. Поверхностный же валец имеет значительные размеры, надвигается на уступ, т. е. образуется донный гидравлический прыжок с затопленной на уступе струей.

Таким образом, смена основных видов сопряжения будет характеризоваться четырьмя предельными глубинами в нижнем бьефе¹.

Следует заметить, что возможны другие формы сопряжения за водосливом с уступом и другая последовательность смены режимов.

Отметим, что применение водослива с вертикальным уступом позволяет с достаточной степенью безопасности для сооружения осуществлять сброс льда и, если необходимо, сплавляемого леса. При сопряжении в виде поверхностного режима с незатопленным поверхностным прыжком сброс льда проходит безопаснее, так как лед не повреждает крепление дна за сооружением и свободно уходит вниз по течению. При сопряжении с затопленным поверхностным прыжком льдины могут вращаться в поверхностном вальце и наносить повреждения поверхности носка уступа. Если сброса льда через водослив с уступом нет, может быть рекомендовано сопряжение с затопленным поверхностным прыжком.

Таким образом, предпочтительнее сопряжение с незатопленным или затопленным поверхностным прыжком.

Гидравлический расчет состоит в определении зависимости заданных E_0 , a , q , угла θ и неизвестных глубин на уступе h и в отводящем русле в бытовых условиях $h_б$. Могут быть и другие задачи.

Составим уравнение Бернулли для сечения перед водосливом и 1—1 на выходе с уступа, причем в сечении 1—1 глубину h определяем в живом сечении, которое нормально к линиям тока, наклоненным под углом θ к горизонту (рис. 24.12). В общем случае угол наклона оси струи θ не равен углу наклона носка θ_n .

¹ Детальные рекомендации см.: Слисский С. М. Гидравлические расчеты высоконапорных гидротехнических сооружений. М.: Энергоатомиздат, 1986.

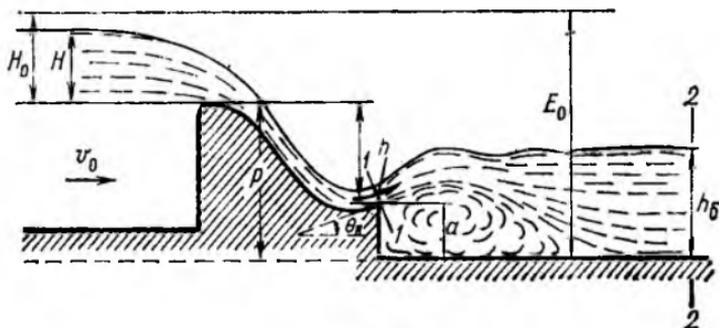


Рис. 24.12

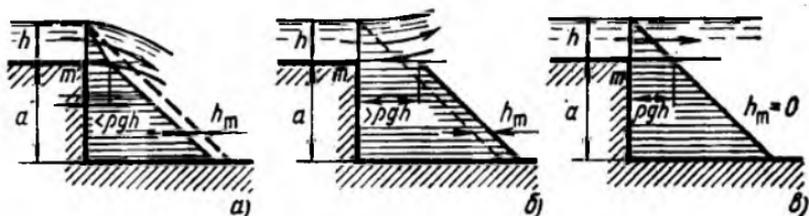


Рис. 24.13

Угол наклона к горизонту θ оси струи, сходящей с носка, зависит от угла наклона носка θ_n , глубины потока на сходе с носка h , радиуса кривизны R и центрального угла поворота носка β .

Примем плоскость сравнения совпадающей с дном нижнего бьефа.

При сходе с уступа давление под струей изменяется соответственно изменению кривизны линий тока в струе.

В пределах криволинейного носка максимальное давление можно определить по формуле А. А. Сабанеева

$$\frac{p_{max}}{\rho g} = h \cos \theta + \frac{v^2 h}{gR},$$

где h — глубина потока; θ — угол наклона касательной к поверхности носка в точке, где вычисляется давление; v — средняя скорость; R — радиус носка (кривизны).

Рассмотрим далее уступ с горизонтальным носком. При опускающейся с уступа струе (выпуклость обращена кверху) давление в угловой точке уступа m меньше ρgh (рис. 24.13, а). При поднимающейся струе линии тока обращены выпуклостью вниз и давление в указанной точке больше ρgh (рис. 24.13, б). При горизонтально сходящей с уступа струе давление под струей равно ρgh (рис. 24.13, в). Полагаем, что давление в сечении 1—1 распреде-

ляется по линейному закону. Тогда уравнение Бернулли примет вид

$$E_0 = a + h \cos \theta + \frac{h_m}{2} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} + \Sigma \zeta \frac{v_1^2}{2g}, \quad (24.1)$$

где a — высота уступа; $v = q/h$ — средняя скорость в сечении 1—1; h — глубина потока в сечении 1—1; h_m — разность высоты, соответствующей действительному давлению в точке m , и высоты, соответствующей давлению ρgh .

Как уже указывалось, h_m может быть равна нулю, больше или меньше нуля. В последнем случае h_m — вакуумметрическая высота.

Далее после преобразования

$$E_0 = a + h \cos \theta + \frac{h_m}{2} + \frac{q^2}{2g\varphi^2 h^2},$$

где

$$\varphi = 1/\sqrt{\alpha + \Sigma \zeta}.$$

Затем применим теорему об изменении количества движения к отсеку, ограниченному сечениями 1—1 и 2—2, где во втором сечении глубина равна бытовой глубине h_0 (см. рис. 24.12). При этом потерями на трение в пределах выбранного отсека пренебрегаем, дно отводящего участка за водосливом считаем горизонтальным, давление по высоте уступа и в сечениях — распределенным по линейному закону. Ось проекций направлена по направлению течения. В единицу времени изменение количества движения отсеков (при $\alpha'_1 = \alpha'_2 = \alpha'$)

$$\rho \frac{\alpha' q}{g} (v_2 - v_1 \cos \theta) = \rho g \frac{\alpha' q^2}{ghh_0} (h - h_0 \cos \theta).$$

Тогда

$$\frac{\alpha' q^2}{ghh_0} (h - h_0 \cos \theta) = P_1 - P_2 + R_y,$$

где

$$P_1 = \frac{1}{2} \rho g (h \cos \theta + h_m) h \cos \theta;$$

$$P_2 = \frac{1}{2} \rho g h_0^2;$$

$R_y = \rho g a (h \cos \theta + h_m + a/2)$ — проекция реакции уступа.

После преобразований получим

$$\frac{2\alpha' q^2}{ghh_0} (h - h_0 \cos \theta) = h_m (h \cos \theta + 2a) + (h \cos \theta + a)^2 - h_0^2.$$

(24.2)

Для первого критического режима А. А. Сабанеев предложил давление под струей при сходе струи с уступа считать равным ρgh , т. е. $h_m = 0$, при этом из уравнений (24.1) и (24.2) исключается одно неизвестное.

Тогда уравнения (24.1) и (24.2) принимают вид

$$E_0 - a = h \cos \theta + \frac{q^2}{2g\varphi^2 h^2}; \quad (24.3)$$

$$\frac{2\alpha' q^2}{ghh_{\delta 1}} (h - h_{\delta 1} \cos \theta) = (h \cos \theta + a)^2 - h_{\delta 1}^2, \quad (24.4)$$

где $h_{\delta 1}$ — бытовая глубина в нижнем бьефе, соответствующая первому критическому режиму. Из полученных двух уравнений можно найти обе неизвестные глубины h и $h_{\delta 1}$.

Но согласно опытным данным Т. Н. Астафичевой, при первом критическом режиме давление под струей может быть и больше, и меньше гидростатического, и равно ему. При первом критическом режиме (индекс 1)

$$h_{m1} = 0,31h_{\delta 1} - 0,5a. \quad (24.5)$$

При $a/p < 0,2$ давление под струей всегда больше гидростатического, т. е. $h_{m1} > 0$; при $a/p = 0,2 \div 0,4$ давление под струей может превышать гидростатическое или быть меньше него, т. е. $h_{m1} > 0$ или $h_{m1} < 0$.

При втором критическом режиме всегда $h_{m2} > 0$:

$$h_{m2} = 0,59(h_{\delta 2} - a). \quad (24.6)$$

Совместно решая (24.1), (24.2), (24.5), находим неизвестные h , h_{m1} и $h_{\delta 1}$. Совместное решение (24.1), (24.2) и (23.6) приводит к отысканию h , h_{m2} и $h_{\delta 2}$.

Отметим, что без дополнительных эмпирических зависимостей для h_{m1} или h_{m2} система уравнений (24.1) и (24.2) была незамкнутой.

На основе уравнений (24.1), (24.2), (24.5) или (24.6) можно решать и другие задачи, в частности определять высоту уступа a и глубину на сходе с уступа h , при которых произойдет сопряжение, например, в виде свободного поверхностного прыжка, если заданы в этом случае E_0 , q , $h_{\delta 1}$, θ , т. е. необходимо найти a_1 , h_{m1} , h .

Результаты экспериментальных исследований позволили ряду авторов предложить способы расчета, где глубины, соответствующие предельным режимам, определяются по эмпирическим формулам.

Поверхностный режим образуется не при всех значениях высоты уступа. По П. М. Степанову при $П_{к1} = 5 \div 50$ минимальная высота уступа, при которой создается поверхностный режим,

$$a_{min} = (4,05 \sqrt[3]{П_{к1}} - \eta) h,$$

где $\eta = 8,4 - 0,4 \theta$; $\theta = \theta_n$ — в град.

24.4. Сопряжение бьефов при отбросе свободной (неподтопленной) струи

Сопряжение бьефов при отбросе свободной струи наблюдается обычно за водосливами с высоким уступом (см. рис. 24.6, а). При этом концевая часть, с которой вода сходит в нижний бьеф, обычно выполняется в виде носка-трамплина, применение которого позволяет отбросить струю дальше в нижний бьеф. За высоким носком-трамплином воздух свободно поступает под струю. Отброс струи возможен и при горизонтальном носке, но в этом случае дальность отлета струи будет значительно меньше.

Сопряжение бьефов в виде свободной отброшенной струи обычно применяется на высоконапорных водосбросных сооружениях (при максимальной разности уровней воды в верхнем и нижнем бьефах, равной или превышающей 40 м) и при грунтах основания в нижнем бьефе, достаточно устойчивых против размыва (например, скальных).

Носки-трамплины имеют различную конструкцию: с плоским дном (рис. 24.14, а—в), с плоским дном и цилиндрической вставкой (рис. 24.14, г), с дном в виде цилиндрической или другой криволинейной поверхности (рис. 24.14, е). Если необходимо увеличить или уменьшить ширину струи в месте падения (по сравнению с сечением на выходе с носка), применяют расширяющий (рис. 24.14, д, е) или сужающий (рис. 24.14, в) трамплин. С помощью подбора конфигурации трамплина можно решать и более сложные задачи (например, сброс потока в узкое каньонообразное русло нижнего бьефа с рассредоточением падающей струи по длине).

Расчеты трамплинов и потока в пределах носков-трамплинов основываются на теории управления бурными потоками¹.

При расчете отлета струи с носка-трамплина в первую очередь рассчитывают движение воды в пределах самого трамплина, для того чтобы построить свободную поверхность в пределах трамплина и определить глубину и среднюю скорость в сечении на сходе с носка-трамплина.

Дальность падения струи определим, рассматривая движения струйки, проходящей через центр сечения на выходе с носка, без учета аэрации и дробления струи в воздухе и пренебрегая также сопротивлением движению струи в воздухе. Приняв систему координат, показанную на рис. 24.15, запишем уравнения движения частицы жидкости из начала координат со скоростью v_1 , направленной под углом θ к оси X :

$$\left. \begin{aligned} x &= v_1 t \cos \theta; \\ z &= \frac{1}{2} g t^2 - v_1 t \sin \theta. \end{aligned} \right\} \quad (24.7)$$

¹ Емцев Б. Т. Двухмерные бурные потоки. М.: Энергия, 1967; Высоцкий Л. И. Управление бурными потоками на водосбросах. М.: Энергоатомиздат, 1990; Слиский С. М. Гидравлические расчеты высоконапорных гидротехнических сооружений. М.: Энергоатомиздат, 1986.

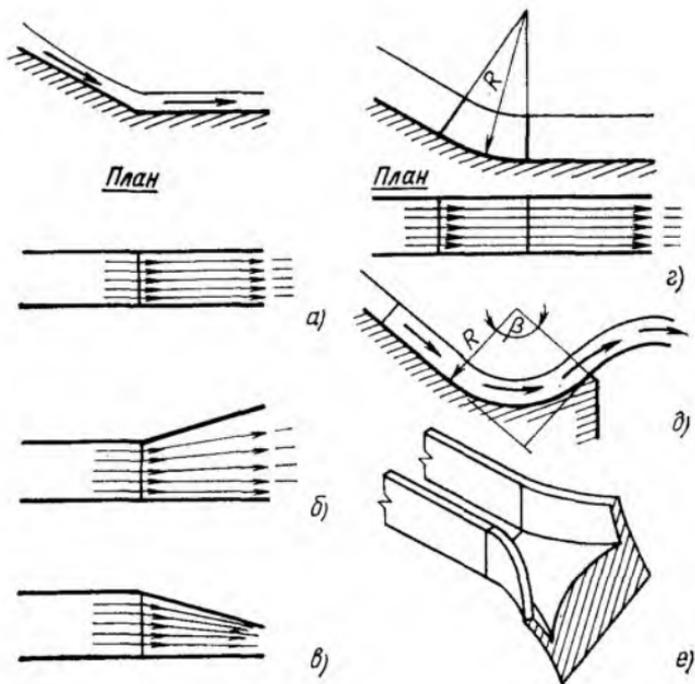


Рис. 24.14

Исключив время t , получим квадратное уравнение относительно x

$$x^2 - \frac{2v_1^2 \sin \theta \cos \theta}{g} x - \frac{2v_1^2 \cos^2 \theta}{g} z = 0. \quad (24.8)$$

Отсюда найдем дальность отлета $x = l_{\text{пад}}$ (падения) струи:

$$l_{\text{пад}} = \frac{v_1^2 \cos \theta}{g} \left(\sin \theta + \sqrt{\sin^2 \theta + \frac{2gz_i}{v_1^2}} \right). \quad (24.9)$$

Здесь z_i — расстояние по вертикали от центра струи на сходе с носка до рассматриваемой горизонтальной плоскости, на которую падает струя.

Если угол θ равен нулю (ось струи на сходе с носка горизонтальная), тогда

$$l_{\text{пад}} = \frac{v_1^2}{g} \sqrt{\frac{2gz_i}{v_1^2}} = v_1 \sqrt{\frac{2z_i}{g}}. \quad (24.10)$$

Пусть перепад между уровнями воды в верхнем и нижнем бьефах, равный z , делится на две составляющие; z_1 — от уровня воды

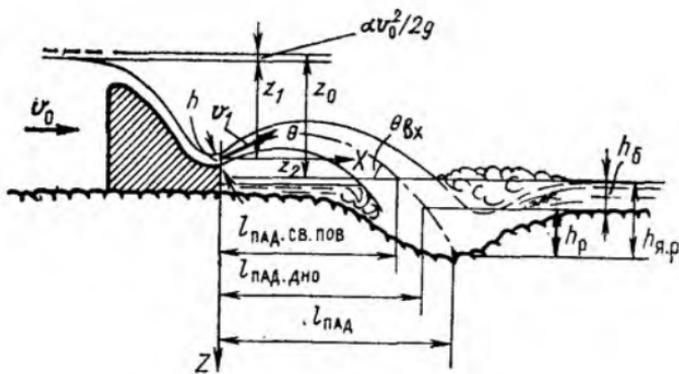


Рис. 24.15

в верхнем бьефе до центра выходного сечения носка; z_2 — от центра этого сечения до уровня воды в нижнем бьефе.

Соответственно перепад с учетом скорости подхода в верхнем бьефе v_0 равен z_0 , тогда

$$z_{01} = z_1 + \frac{\alpha_0 v_0^2}{2g}.$$

Подставив вместо скорости в центре выходного сечения струи ее значение

$$v_1 = \varphi \sqrt{2gz_{01}},$$

найдем для дальности отдела струи при $\theta > 0$

$$l_{\text{пад}} = x = 2\varphi^2 z_{01} \cos \theta_{\text{вх}} \left(\sqrt{\sin^2 \theta + \frac{z_i}{\varphi^2 z_{01}}} + \sin \theta \right). \quad (24.11)$$

При $\theta = 0$ $l_{\text{пад}} = 2\varphi \sqrt{z_{01} z_i}$.

Задавая z_i различные значения, получаем дальность отлета струи:

до свободной поверхности в нижнем бьефе (при $z_i = z_2$)

$$l_{\text{пад. св. пов}} = \frac{v_1^2 \cos \theta}{g} \left(\sin \theta + \sqrt{\sin^2 \theta + \frac{2gz_2}{v_1^2}} \right);$$

до дна при отсутствии размыва (при криволинейной траектории центральной струйки в воде), т. е. при $z_i = z_2 + h_б$,

$$l_{\text{пад. дно}} = \frac{v_1^2 \cos \theta}{g} \left(\sin \theta + \sqrt{\sin^2 \theta + \frac{2g(z_2 + h_б)}{v_1^2}} \right).$$

В реальных условиях ось отброшенной струи воды под водой представляет собой прямую линию в отличие от приведенной в предыдущей формуле параболической кривой.

Поэтому правильнее длину отлета струи на дно ($z_i = z_2 + h_6$) или на дно ямы размыва глубиной h_p ($z_i = z_2 + h_6 + h_p$) представлять в виде

$$l_{\text{пад. дно}} = l_{\text{пад. св. пов}} + h_6 / \text{tg } \theta_{\text{вх}}$$

и

$$l_{\text{пад. я. р}} = l_{\text{пад. св. пов}} + (h_6 + h_p) / \text{tg } \theta_{\text{вх}}.$$

Угол наклона струи при входе под уровень нижнего бьефа при $\varphi = 1$

$$\text{tg } \theta_{\text{вх}} = \sqrt{\text{tg}^2 \theta + \frac{2gz_2}{v_1^2 \cos^2 \theta}}$$

или

$$\text{tg } \theta_{\text{вх}} = \sqrt{\text{tg}^2 \theta + \frac{2g(0,5h_n \cos \theta + a - h_6)}{v_1^2 \cos^2 \theta}}.$$

Если направление схода струи с носка горизонтальное, т. е. $\theta = 0$, тогда

$$\text{tg } \theta_{\text{вх}} = \frac{\sqrt{2g(0,5h_n + a - h_6)}}{v_1} = \frac{\sqrt{2gz_2}}{v_1}.$$

Скорость входа струи под уровень нижнего бьефа определяется по формуле

$$v_{\text{вх}} = \varphi \sqrt{2gz_0}.$$

Так как скоростной напор, соответствующий скорости v_0 в верхнем бьефе, $\alpha_0 v_0^2 / (2g) \ll z$, то

$$v_{\text{вх}} = \varphi \sqrt{2gz}.$$

Наибольшая дальность отлета струи наблюдается при различных углах схода оси струи с носка θ в зависимости от отношения z_{01}/z_0 (или z_1/z), так как скоростной напор $\alpha_0 v_0^2 / 2g$ пренебрежимо мал.

Так, при $z_1/z = 0,5$ максимальная дальность отлета соответствует углу $\theta = 0$, а при $z_1/z = 1$ максимальное значение $l_{\text{пад}}$ — при $\theta = 30^\circ$.

Эти зависимости можно получить, если исследовать, при каком значении z_{01}/z_0 (или z_1/z) отношение $l_{\text{пад}}/z_0$ будет максимальным.

Угол входа сбрасываемой струи под уровень воды в нижнем бьефе зависит от конструктивных особенностей сооружения. При свободно падающей струе (рис. 24.6, б) угол входа $\theta_{\text{вх}}$ близок к 90° .

При отбросе струи с носка-трамплина водосливной плотины осредненные значения угла входа $\theta_{\text{вх}}$ чаще всего изменяются в диапазоне $20-40^\circ$.

Таблица 24.1

$\Pi_{к1}$	50	60	75	100	120
k_a	~0,87	0,8	~0,71	0,57	~0,49

Для согласования с наблюдаемыми в действительности расчетные значения $l_{\text{пад}}$ умножаются на коэффициент k_a , учитывающий влияние аэрации и дробления (расщепления) струи в полете. Значения коэффициента k_a по данным ВНИИГ принимаются в зависимости от значения параметра кинетичности $\Pi_{к1} = v_1^2/gh$ в сечении на сходе с носка-трамплина (табл. 24.1).

Если $\Pi_{к1} < 30 \div 35$, то k_a равен единице, т. е. влияние аэрации и расщепления струи не учитывается.

Таким образом, расчет сопряжения в виде отброшенной струи сводится к построению свободной поверхности потока, определению глубины, давлений и средних скоростей в пределах носка-трамплина, определению угла θ и параметров отброшенной струи. Затем рассчитываются параметры ямы размыва.

24.5. Местный размыв при отбросе свободной струи

При падении отброшенной струи на дно отводящего русла в нижнем бьефе происходит местный размыв, образуется яма (воронка) местного размыва, которая развивается в течение некоторого времени, а затем наступает стабилизация процесса размыва. Но даже в стабилизировавшейся яме размыва отдельные частицы или отдельные размываемого грунта находятся в движении. Эти частицы могут подниматься над дном ямы местного размыва и иногда даже попадать в поступательно перемещающийся транзитный поток и уноситься вниз по течению.

Рассмотрим схему местного размыва (рис. 24.16), считая дно до ямы размыва и за ней находящимся приблизительно на одинаковых отметках.

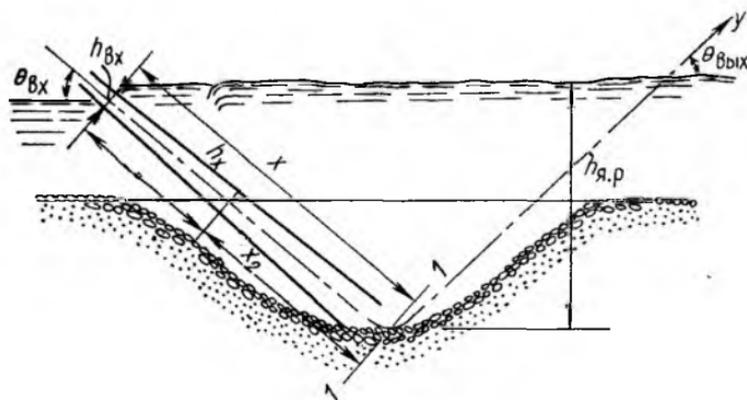


Рис. 24.16

Многочисленными экспериментами (Ц. Е. Мирцхулава, М. А. Михалев, Т. Х. Ахмедов) установлено, что после падения в воду струя растекается в толще водного потока. Движение этой струи происходит не в безграничной жидкости, а в относительно небольшой зоне ямы размыва, границы которой (дно и откосы) представляют собой шероховатые поверхности.

При углах входа струи под уровень нижнего бьефа $\theta_{вх} = 60^\circ \div 90^\circ$ происходит двустороннее растекание поступившего в нижний бьеф потока; при углах $\theta_{вх}$, близких к 90° , образуются две практически равные по объему водоворотные области с горизонтальными осями вращения. При углах $\theta_{вх} < 60^\circ$ преобладает отток в сторону нижерасположенного участка отводящего русла (донный режим сопряжения). Обратные скорости в водоворотной области под струей уменьшаются, при $\theta_{вх} < 25 \div 30^\circ$ валец под струей практически исчезает.

При полете струи средняя часть струи как бы обгоняет крайние части. Первоначальная прямоугольная при отлете с носка форма струи шириной b изменяется. Но если рассмотреть среднюю часть струи, форму поперечного сечения этой части струи можно принять за прямоугольную.

При движении струи в толще воды различают два участка (рис. 24.16): первый — растекание струи до сечения $I-I$, где начинается поворот струи, и второй — движение струи вдоль низового откоса до выхода в нижележащий участок русла. На первом участке поперечный размер струи (толщина струи), измераемый по нормали к оси струи, линейно увеличивается согласно эмпирической зависимости, предложенной М. А. Михалевым,

$$h_x = h_{вх} + 0,43x,$$

где $h_{вх}$ — толщина струи на входе под уровень нижнего бьефа; x — координата вдоль оси струи на первом участке.

Свободная поверхность в рассматриваемой области принимается горизонтальной. Кроме того, струя отклоняется от дна приблизительно под тем же углом, под которым она достигает дна. т. е. угол входа под воду приблизительно равен углу между осью входящей струи и свободной поверхностью.

Как указывает Ц. Е. Мирцхулава, в натуральных условиях часто

$$h_{вх} = 0,8q/u_{вх}. \quad (24.12)$$

Максимальная скорость на оси ниспадающей струи изменяется следующим образом:

$$u_{max} = \frac{u_{вх}}{0,9 + 0,09x_1/h_{вх} + 0,12x_2/h_{вх}}, \quad (24.13)$$

где x_1 — координата вдоль оси на участке от свободной поверхности до линии неразмытого дна; x_2 — координата вдоль оси струи от линии неразмытого дна до места максимального размыва.

Согласно (24.13) гашение скоростей в яме размыва происходит более интенсивно, чем в пределах глубины русла.

Максимальная скорость на оси восходящей струи изменяется по формуле

$$u_{maxв} = \frac{u_{max}}{0,9 + 0,4 (y/h_x)^2}, \quad (24.14)$$

где y — координата вдоль оси восходящей струи от точки соприкосновения ниспадающей струи с дном.

Картину местного размыва можно представить следующим образом. В несвязных грунтах размыв прекращается, когда максимальная скорость восходящей струи будет равна гидравлической крупности частиц, покрывающих дно стабилизировавшейся ямы размыва. К моменту прекращения размыва часть мелких частиц из ямы размыва будет вынесена поступательным потоком. Поэтому дно ямы размыва покрыто более крупными частицами, т. е. образуется так называемая отмостка.

Для надежной защиты дна воронки размыва необходим как минимум двухрядный по глубине слой из крупных частиц, образующих отмостку.

Размыв прекратится, когда

$$n u_{\max} = \omega,$$

где n — отношение мгновенных максимальных скоростей к осредненным в точке; ω — гидравлическая крупность частиц, которая может быть найдена по В. Н. Гончарову, если в качестве характеристики размера частиц несвязного грунта, выстилающих дно воронки размыва в момент стабилизации, принять d_{90} — диаметр частиц, меньше которого имеется по кривой зернового состава более 90 % по массе:

$$\omega = \sqrt{\frac{2g(\rho_{\text{гр}} - \rho_0)d_{90}}{1,75\rho_0}};$$

$\rho_{\text{гр}}$ — плотность грунта; ρ_0 — плотность воды с учетом ее аэрации.

Глубина размыва уменьшается с увеличением аэрации (в воздухе она а с ы щ е н и я) воды. В то же время рост концентрации воздуха приводит к увеличению гидравлической крупности твердых частиц в воде.

Глубина воды в яме размыва, считая от свободной поверхности, при $\theta_{\text{вх}} \geq 15^\circ$ равна

$$h_{\text{я.р}} = \frac{x \sin \theta_{\text{вх}}}{1 - 0,175 \operatorname{ctg} \theta_{\text{вх}}} = \frac{(x_1 + x_2) \sin \theta_{\text{вх}}}{1 - 0,175 \operatorname{ctg} \theta_{\text{вх}}}.$$

Приняв $h_x \approx 0,43 x$ и учитывая (24.12) — (24.14), Ц. Е. Мирцхулава получил следующую формулу для максимальной глубины воды в яме размыва в несвязных грунтах:

$$h_{\text{я.р}} = \left(\frac{3\eta u_{\text{вх}} h_{\text{вх}}}{\omega} - 7,5 h_{\text{вх}} \right) \frac{\sin \theta_{\text{вх}}}{1 - 0,175 \operatorname{ctg} \theta_{\text{вх}}} + 0,25 h_0, \quad (24.15)$$

где h_0 — бытовая глубина в нижнем бьефе; $\eta = 1,5 \div 2$, меньшее значение η соответствует лабораторным условиям, а большее — натурным.

Для частиц диаметром меньше 4 мм вводится коэффициент, учитывающий особенности обтекания потоком мелких частиц при соответственно малых значениях чисел Рейнольдса, составленных по диаметру частицы (табл. 24.2). На коэффициент n_1 умножается первый член в скобке в формуле (24.15).

При размыве связных грунтов под воздействием падающей струи происходит разрушение грунта на отдельные — агрегаты. В начале размыва отрываются отдельные большего размера, чем в конце этого процесса. До того как агрегат связного грунта будет оторван от основной массы, он подвергается воздействию струи жидкости и раскисивается. В момент, когда воздействие, обусловленное максимальными мгновенными значениями скорости, превысит сопротивляемость грунта на размыв, агрегат оторвется и будет унесен потоком за пределы воронки. Если оторвется отдельность такого большого размера, что поток не в состоянии будет вынести ее из ямы размыва сразу, эта отдельность движется внутри ямы размыва, дробится там на части и затем выносятся. По опытным данным средний размер агрегатов в стабилизовавшейся воронке размыва равен приблизительно 4 мм.

Т а б л и ц а 24.2

$d, \text{ мм}$	4	3	2	1	0,5	0,2	0,1
n_1	1	0,9	0,8	0,5	0,35	0,2	0,1

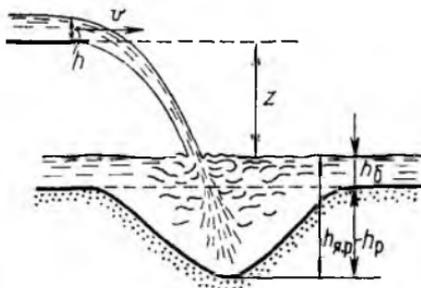


Рис. 24.17

Стабилизация размыва наступает, когда максимальная скорость на оси струи непосредственно вблизи дна u_{max} станет равной (или меньше) донной неразмывающей скорости в яме $u_{\Delta \text{доп. я}}$.

Исследования показывают, что в яме размыва допускаемая донная (неразмывающая) скорость $u_{\Delta \text{доп. я}}$ превышает аналогичную скорость при общем размыве в равномерном движении $u_{\Delta \text{доп}}$

$$u_{\Delta \text{ доп. я}} = u_{\Delta \text{ доп}} \left(\cos^3 \theta_{\text{вх}} + 3 \sqrt{\sin^2 \theta_{\text{вх}}} \right). \quad (24.16)$$

В среднем допускаемые неразмывающие скорости в ямах размыва принимают равными

$$u_{\Delta \text{ доп. я}} \approx 3u_{\Delta \text{ доп.}} \quad (24.17)$$

Исходя из равенства $u_{max} = u_{\Delta \text{ доп. я}}$ и учитывая (24.17), получаем максимальную глубину воды в яме размыва для связных грунтов

$$h_{\text{я. р}} = \left(\frac{8,3u_{\text{вх}}h_{\text{вх}}}{u_{\Delta \text{ доп. я}}} - 7,5h_{\text{вх}} \right) \frac{\sin \theta_{\text{вх}}}{1 - 0,175 \text{ctg} \theta_{\text{вх}}} + 0,25h_0. \quad (24.18)$$

К числу сил, удерживающих отдельность, относят силы усталостной прочности на отрыв, вес отдельности в воде, пригружающее действие глубины воды в воронке размыва и силу гидродинамического давления струи на дно воронки.

В скальных грунтах явление местного размыва происходит при наличии связей между отдельностями скалы. Схематично эти отдельности представляют в виде параллелепипедов. Данные о размерах отдельностей получают по результатам инженерно-геологических исследований.

Исходя из расчета по предельным состояниям, Ц. Е. Мирцхулава рассмотрел действие на отдельность скалы максимальных динамических нагрузок от воздействия струи с учетом пульсации скоростей и удерживающих сил (сил сопротивления). К первым относятся горизонтальная сдвигающая и вертикальная подъемная составляющие силы воздействия. Удерживают скальную отдельность вертикальная и тангенциальная составляющие веса отдельности и силы, характеризующие усталостную прочность связей между отдельностями скального основания. Под действием указанных сил отдельность скалы находится в условиях внецентренного сжатия. Опытные данные показывают, что в среднем отдельности выступают в поток на 0,1 высоты блока (отдельности).

В предельном случае стабилизация размыва наступает, когда осредненная скорость струи (осевая) на дне ямы размыва u_{Δ} равна максимальной скорости струи в том же месте u_{max} .

Приравнивая u_{Δ} и u_{max} , можно получить зависимость для максимальной глубины воды в яме размыва.

Форма ямы размыва, если рассматривать осредненные ее параметры, оказывается зависящей от вида и свойств грунтов, которые подвергаются размыву падающей струей. Если грунт несвязный, продольное сечение ямы

размыва — трапеция с малой шириной по дну или даже треугольник (рис. 24.17), при связных и скальных грунтах форма ямы размыва трапециевидальная или близкая к прямоугольной.

В скальных грунтах заложение верхового откоса ямы размыва принимается равным 2,2—3, а низового — 1,5. Ширина ямы размыва по дну равна $(2 \div 2,5) h_{кр}$.

24.6. Контрольные вопросы

1. Сформулируйте, какие режимы сопряжения могут встретиться на практике. Какие схемы сопряжения, кроме одной из форм гидравлического прыжка, могут встретиться? Как различаются формы поверхностного и смешанного поверхностно-донного режима? Нарисуйте схемы.

2. Какие случаи сопряжения возможны при донном режиме сопряжения? Проанализируйте их с энергетической точки зрения. Когда гидравлический прыжок будет отогнанным, надвинутым или начинаться в критическом положении (в сжатом сечении)? Что такое степень затопления гидравлического прыжка?

3. Чем отличаются так называемые высокий уступ и низкий уступ? Каковы основные особенности сопряжения с поверхностным и поверхностно-донными режимами? Какие режимы при этом различаются? Что такое предельные глубины?

4. Как выполняются гидравлические расчеты при рассмотрении сопряжения с поверхностным режимом? В чем особенности применения уравнения Бернулли и теоремы об изменении количества движения в этих случаях? Какие предпосылки принимаются при этом?

5. Всегда ли образуется поверхностный режим при наличии уступа? В каких случаях его может не быть?

6. Кратко опишите особенности носков-трамплинов, применяемых при отбросе свободной струи. Выведите формулы для длины отлета (падения) струи за высокий уступом при различных значениях угла оси струи на сходе с носка с горизонтом.

7. Определите скорость вылета струи в створе выходного сечения носка и различные характерные параметры (длину падения до свободной поверхности в нижнем бьефе, до дна, при отсутствии размыва) и угол наклона струи при выходе под уровень нижнего бьефа, а также скорость струи при входе под уровень нижнего бьефа.

8. Покажите, как влияет аэрация и расщепление струи на значения длины падения струи.

9. Опишите характерные особенности механизма местного размыва дна при отбросе свободной струи. Как определяется геометрия ямы размыва?

Глава 25

РАСЧЕТ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ГАШЕНИЯ ЭНЕРГИИ

25.1. Виды гасителей энергии

Как уже отмечалось в § 24.1, при донном режиме сопряжения и спокойном состоянии потока в отводящем русле ($h_6 > h_{кр}$) и уловии $h'_c > h_6$ образуется отогнанный гидравлический прыжок. Местоположение его определяется длиной отгона прыжка между