

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

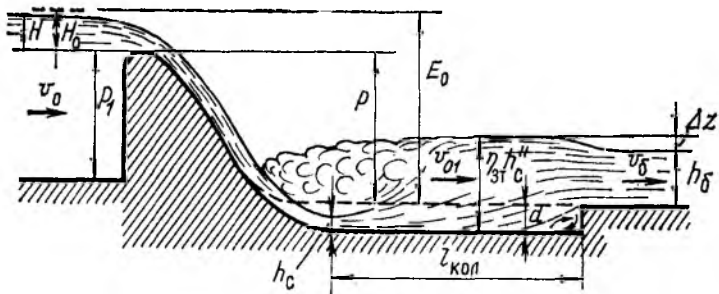


Рис. 25.1

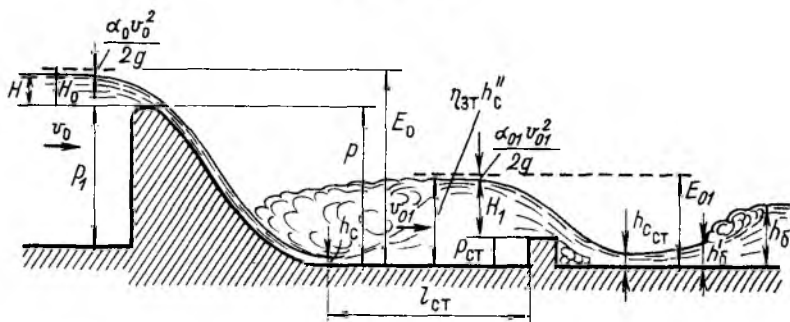


Рис. 25.2

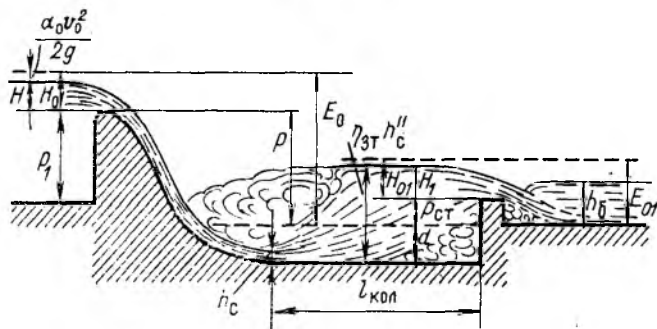


Рис. 25.3

сечениями с глубиной  $h'_c$  и глубиной  $h'_b$ , сопряженной с бытовой глубиной  $h_b$ .

Длина кривой подпора на участке отгона определяется в соответствии с рекомендациями, изложенными в гл. 17, и может быть достаточно большой. На этом участке поток находится в бурном состоянии, средние скорости могут быть значительными, что вызы-

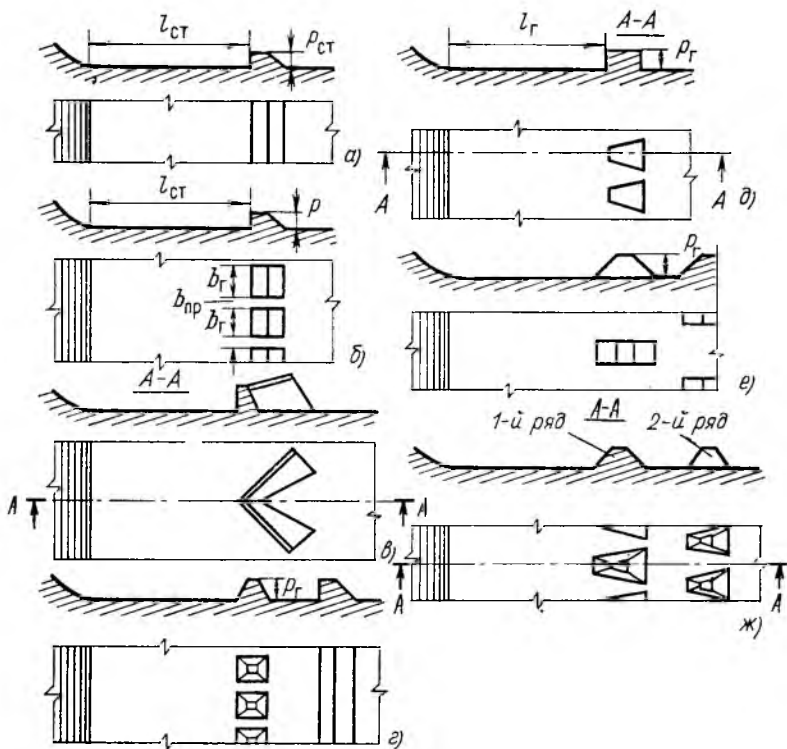


Рис. 25.4

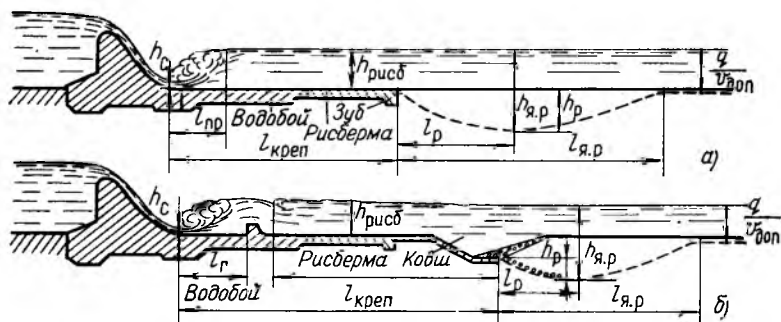


Рис. 25.5

вает необходимость больших объемов работ по укреплению дна и откосов отводящего русла на рассматриваемом участке. Поэтому сокращение или исключение отгона гидравлического прыжка, т. е. обеспечение перехода потока из бурного в спокойное состояние

в пределах сооружения, в большинстве случаев является предпочтительным.

Уменьшение длины отгона прыжка может быть достигнуто за счет создания искусственной, увеличенной по сравнению с обычной шероховатости на части длины отгона прыжка. Для обеспечения сопряжения с надвинутым гидравлическим прыжком необходимо создать в нижнем бьефе соответствующую глубину или погасить часть избыточной энергии потока  $\Delta_2 E$  (см. § 24.1) с помощью специальных гасителей энергии, которые помимо гашения избыточной энергии могут оказывать влияние и на кинематику, и на размывающую способность потока в нижнем бьефе.

Детальное технико-экономическое сравнение вариантов позволяет выбрать наиболее рациональный. В редких случаях возможно применение схемы сопряжения с отогнанным прыжком, в большинстве случаев проектируют устройства, позволяющие осуществить сопряжение в виде надвинутого гидравлического прыжка, т. е. обеспечивающие затопление гидравлического прыжка.

К таким устройствам (г а с и т е л я м э н е р г и и) относятся следующие: водобойный колодец (рис. 25.1), образованный низовым уступом; водобойная стенка (рис. 25.2); комбинированный водобойный колодец (рис. 25.3); специальные гасители энергии (рис. 25.4).

При донном режиме сопряжения поток обладает повышенной размывающей способностью, вследствие чего ниже крепления гидротехнических сооружений происходит местный размыв (см. § 25.7). Крепление в нижнем бьефе состоит из водобойной части (водобоя) и рисбермы (рис. 25.5). При небольших перепадах уровней между верхним и нижним бьефами применяют рисбермы из каменной наброски или отмостки, сборных бетонных или железобетонных элементов, плит и т. п.

При необходимости в нижнем бьефе располагаются в пределах водобойной части гасители энергии.

## 25.2 Гидравлический расчет водобойного колодца

Водобойные колодцы предназначены для создания в нижнем бьефе непосредственно за сооружением такой глубины, при которой сопряжение произойдет в форме надвинутого гидравлического прыжка. При гидравлическом расчете водобойного колодца необходимо определить глубину колодца и его длину.

**Расчет глубины водобойного колодца.** Если бы требовалось обеспечить с помощью водобойного колодца местоположение гидравлического прыжка в сжатом сечении (предельное положение), глубина воды в водобойном колодце должна была быть равна второй сопряженной глубине  $h_c''$ , т. е. (см. рис. 25.1)

$$h_c'' = d + h_0 + \Delta z, \quad (25.1)$$

где  $d$  — глубина водобойного колодца (искомый параметр);  $h_6$  — глубина в отводящем русле, соответствующая бытовым условиям;  $\Delta z$  — перепад при выходе потока из водобойного колодца в отводящее русло.

Перепад  $\Delta z$  образуется за счет разности скоростных напоров в отводящем русле и в водобойном колодце с учетом сопротивлений на выходе из колодца.

Для определения  $\Delta z$  составим уравнение Бернулли для сечений 1—1 (перед уступом) и 2—2 (в отводящем русле). Приняв плоскость сравнения на уровне дна отводящего русла, получим

$$\Delta z + \frac{\alpha_{01} v_{01}^2}{2g} = \frac{\alpha v_6^2}{2g} + \Sigma \zeta \frac{v_6^2}{2g}.$$

Тогда

$$\Delta z_0 = \frac{v_6^2}{2g\varphi^2} \quad (25.2)$$

или

$$\Delta z = \frac{v_6^2}{2g\varphi^2} - \frac{\alpha_{01} v_{01}^2}{2g}. \quad (25.3)$$

Для плоской задачи перепад составит (при  $\eta_{зт} = 1$ )

$$\Delta z = \frac{q^2}{2g\varphi^2 h_6^2} - \frac{\alpha_0 l q^2}{2g (h_c'')^2}. \quad (25.4)$$

Здесь  $q$  — удельный расход;  $\varphi = 1/\sqrt{\alpha + \Sigma \zeta}$  — коэффициент скорости;  $v_6$  — средняя скорость в отводящем русле при бытовой глубине;  $v_{01}$  — средняя скорость в водобойном колодце при глубине  $h_c'$ , равная  $q/h_c'$ .

Если пренебречь скоростным напором, соответствующим средней скорости в водобойном колодце  $\alpha_{01} v_{01}^2/2g$ , тогда

$$\Delta z = \frac{q^2}{2g\varphi^2 h_6^2}. \quad (25.5)$$

Из (25.1) можно получить глубину водобойного колодца

$$d = h_c'' - (h_6 + \Delta z). \quad (25.6)$$

Для того чтобы обеспечить сопряжение в нижнем бьефе в форме надвинутого гидравлического прыжка, необходимо увеличить глубину водобойного колодца. При этом глубина воды в колодце должна быть равна  $\eta_{зт} h_c'$  (где  $\eta_{зт}$  — степень затопления прыжка). Увеличение глубины воды в водобойном колодце обеспечивает надежность сопряжения в виде надвинутого прыжка. Тогда

$$d = \eta_{зт} h_c'' - (h_6 + \Delta z). \quad (25.7)$$

Обычно при расчете водобойного колодца принимают  $\eta_{зт} = 1,05 \div 1,1$ , а коэффициент скорости  $\varphi = 0,95 \div 1,0$ .

Если пренебречь перепадом  $\Delta z$ , глубина водобойного колодца определяется при  $\eta_{зт} = 1$ , т. е.

$$d = h_c'' - h_6. \quad (25.8)$$

Обычно расчет глубины водобойного колодца  $d$  ведется путем последовательного приближения. Глубины  $h_c$  и  $h_c''$  определяются с учетом заранее не известной глубины  $d$ .

Сначала по способу, описанному в § 22.12, определяется значение функции  $\Phi(\tau_c)$  по известным  $q$ ,  $\varphi$  и  $E_0$ , а затем находится  $h_c''$ .

Если расчет проводится с учетом  $\Delta z$ , а из сопоставления  $h_c''$  и известной  $h_6$  устанавливается, что гидравлический прыжок отогнан, в первом приближении принимается

$$d_1 = \eta_{зт} h_c'' - (h_6 + \Delta z).$$

Индекс 1 указывает на первое приближение.

При этом дно нижнего бьефа понизится и удельная энергия потока в верхнем бьефе, найденная по отношению к дну нижнего бьефа, изменится:

$$E_{01} = E_0 + d_1.$$

Соответственно изменятся  $\Phi(\tau_c)$ ,  $h_c$  и вторая сопряженная глубина, которая будет равна  $h_{c1}''$ .

Вновь определяем глубину водобойного колодца:

$$d_2 = \eta_{зт} h_{c1}'' - (h_6 + \Delta z).$$

Если глубина водобойного колодца  $d_2$  сравнивается с глубиной  $d_1$ , расчет глубины водобойного колодца окончен. В противном случае расчет продолжается до получения

$$d_{i+1} \approx d_i,$$

где  $i$  — номер приближения.

**Длина водобойного колодца.** Важно отметить, что только правильно запроектированный водобойный колодец обеспечивает сопряжение за колодцем, удовлетворительное с точки зрения гидравлических условий работы отводящего русла.

Длина водобойного колодца должна быть достаточной для надежного размещения в его пределах гидравлического прыжка. В данном случае гидравлический прыжок с низовой стороны подпирается уступом на выходе из водобойного колодца (подпертый гидравлический прыжок). Длина подпертого гидравлического прыжка  $l_{п. пр}$  меньше, чем длина совершенного прыжка  $l_{пр}$ . Это уменьшение, оцениваемое отношением  $l_{п. пр}/l_{пр}$ , по данным опытов различных исследователей изменяется примерно от 0,7 до 0,8, т. е. длина сравниваемых совершенного и подпертого гидравлических прыжков различается приблизительно в 1,4—1,25 раза. Это обстоятельство учитывается при назначении длины водобойного колодца

$$l_{кол} = l_{пад} + 3h_c''. \quad (25.9)$$

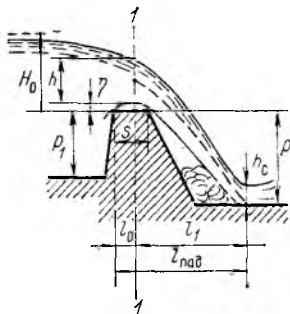


Рис. 25.6

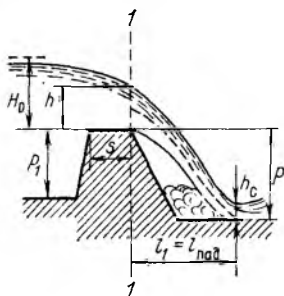


Рис. 25.7

При  $l_{\text{пад}} = 0$  (за водосливом практического профиля криволинейного очертания, см. рис. 25.1) длина водобойного колодца

$$l_{\text{кол}} = 3h_c^* \quad (25.9a)$$

Ошибка в назначении длины водобойного колодца [уменьшение его длины по сравнению с определяемой по (25.9)] может привести к отлету струи с последующим поверхностным режимом сопряжения, с образованием мощного донного вальца и со значительными придонными скоростями при последующем опускании струи к дну. Такое сопряжение представляет большую опасность для крепления дна. При определении  $l_{\text{пад}}$  по (25.9) считаем, что сжатое сечение располагается там, где частица, находящаяся в центре переливающейся струи, достигнет дна сразу за водосливом. Тогда

$$l_{\text{пад}} = l_0 + l_1,$$

где  $l_0$  — расстояние от напорной грани водослива до сечения  $1-1$ , которое принимается за начальное при изучении падения струи;  $l_1$  — расстояние от начального сечения до сжатого (рис. 25.6).

Для водослива практического профиля криволинейного очертания сжатое сечение расположено непосредственно за водосливом.

**Дальность падения струи**  $l_{\text{пад}}$  определяется по расстоянию траектории частицы жидкости, переливающейся через водослив, например водослив с тонкой стенкой (рис. 25.6).

За время  $t$  частица, находящаяся в центре тяжести сечения  $1-1$ , пройдет расстояние:

$$\left. \begin{array}{l} \text{по горизонтали} \\ x = v_1 t; \\ \text{по вертикали} \\ z = gt^2/2. \end{array} \right\} \quad (25.10)$$

Здесь условно принято, что в центре тяжести сечения 1—1 скорость ориентирована горизонтально и равна средней скорости в сечении. Отсюда

$$z = gx^2/2v_1^2 \quad (25.11)$$

или

$$x = v_1/\sqrt{2z/g}. \quad (25.12)$$

Для водослива с прямоугольным поперечным сечением (именно такие сечения условились рассматривать в нижнем бьефе) средняя скорость связана с удельным расходом таким образом:  $v = q/h$ , следовательно,

$$x = \frac{q}{h} \sqrt{\frac{2z}{g}}.$$

Здесь  $h$  — вертикальный размер струи в сечении 1—1.

Учитывая, что для водосливов

$$q = m\sqrt{2g} H_0^{3/2},$$

имеем

$$x = \frac{2mH_0^{3/2}}{h} \sqrt{z}. \quad (25.13)$$

Расстояние от начального сечения до сжатого определяется при  $z = z_{max} = p + \eta + h/2$  (где  $z_{max}$  — максимальная высота падения частицы, находившейся в центре сечения 1—1, т. е. в «средней» струйке жидкости).

Тогда

$$l_1 = \frac{2mH_0^{3/2}}{h} \sqrt{p + \eta + \frac{h}{2}}, \quad (25.14)$$

где  $\eta$  — наибольшая высота подъема нижней поверхности струи над гребнем водослива (сечение 1—1 принято именно в створе наибольшего подъема — для водослива с тонкой стенкой).

Так как значения  $l_0$ ,  $m$ ,  $h$ ,  $\eta$  для каждого водослива могут быть конкретизированы, то приведем необходимые значения параметров и формулы для  $l_1$ .

Водослив с тонкой стенкой:  $l_0 = 0,3 H_0$ ;  $m \approx 0,42$ ;  $h = 0,668 H_0$ ;  $\eta = 0,112 H_0$ . При этом принято  $H \approx H_0$  (коэффициенты в выражениях  $h$  и  $\eta$  получены применительно к  $H$ , а не к  $H_0$ ).

Тогда

$$l_{пад} = 0,3H_0 + 1,25 \sqrt{H_0(p + 0,45H_0)}. \quad (25.15)$$

Согласно М. Д. Чертоусову расчет по (25.15) дает уменьшенные по сравнению с опытными значения, поэтому в (25.15) вводится



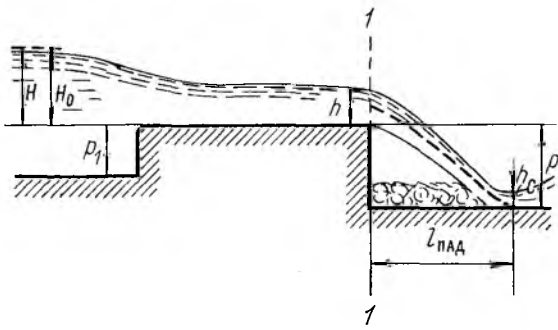


Рис. 25.8

поправочный коэффициент, равный 1,1, и тогда формула принимает вид

$$l_{\text{пад}} = 0,33H_0 + 1,38 \sqrt{H_0(p + 0,45H_0)}.$$

Водослив практического профиля прямолинейного очертания (прямоугольный и трапецидальный с горизонтальным гребнем). При  $0,67 < s/H_0 < 2$  начальное сечение располагают в конце гребня водослива (рис. 25.7), и подъема струи в этом случае нет:  $\eta = 0$ ;  $h = 0,6 H_0$ ;  $m \approx 0,4$ . Тогда  $z_{\text{max}} = p + 0,3 H_0$ .

Формулу (25.14) запишем в виде

$$l_{\text{пад}} = 1,33 \sqrt{H_0(p + 0,3H_0)}.$$

Водослив с широким порогом (неподтопленный). Начальное сечение назначается в конце порога водослива (рис. 25.8);  $l_0 = 0$ ;  $\eta = 0$ ;  $m = 0,32 \div 0,35$ . Глубина в сечении 1—1  $h \approx 0,47 H_0$ .

Тогда

$$l_1 = 4m \sqrt{H_0(p + 0,24H_0)}.$$

Подставляя конкретные значения коэффициентов расхода, можно найти дальность падения струи. При  $m = 0,385$  формула Чертоузова имеет вид

$$l_1 = 1,64 \sqrt{H_0(p + 0,24H_0)}. \quad (25.16)$$

Таким образом, получили формулы глубины водобойного колодца и его длины.

Понятно, что при расчете  $l_{\text{пад}}$  для водобойного колодца глубиной  $d$  в формулах вместо  $p$  должна подставляться сумма  $p + d$ .

В ответственных случаях водобойные колодцы исследуются в лабораториях на моделях и в результате исследований уточняются размеры водобойных колодцев.

### 25.3. Гидравлический расчет водобойной стенки

Водобойная стенка (см. рис. 25.2), так же как и водобойный колодец, предназначена для создания такой глубины за водосливом в нижнем бьефе, которая обеспечит сопряжение в виде надвинутого гидравлического прыжка. При устройстве водобойной стенки отметка дна на водобое сохраняется без изменения.

При гидравлическом расчете водобойной стенки определяются высота водобойной стенки  $p_{ст}$  и расстояние от сооружения (или от сжатого сечения в нижнем бьефе) до водобойной стенки  $l_{ст}$ .

Обычно применяют прямоугольные или трапецеидальные водобойные стенки с горизонтальным гребнем шириной  $s$ . Водобойные стенки работают как водосливы. В зависимости от относительной ширины гребня  $s/H$  водобойная стенка может представлять собой водослив с тонкой стенкой или водослив практического профиля прямолинейного очертания.

Высота водобойной стенки определяется исходя из условия получения перед водобойной стенкой такой глубины, чтобы образовался надвинутый гидравлический прыжок

$$\eta_{зт} h_c'' = p_{ст} + H_1.$$

Отсюда искомая высота водобойной стенки

$$p_{ст} = \eta_{зт} h_c'' - H_1, \quad (25.17)$$

где  $H_1$  — напор над гребнем водобойной стенки.

При расчете водобойной стенки удельная энергия  $E_0$  и сопряженные глубины  $h_c$  и  $h_c''$  не изменяются, поскольку неизменной остается отметка водобоя.

Расчет ведется в следующей последовательности. Сначала определяются  $h_c$  и вторая сопряженная глубина  $h_c''$  по  $\Phi$  ( $\tau_c$ ), т. е. по известным  $q$ ,  $\varphi$  и  $E_0$ . Если  $h_c'' > h_0$  гидравлический прыжок будет отогнан.

Находится напор над гребнем водобойной стенки. В первом приближении предполагается, что она является неподтопленной, т. е. из формулы расхода через водослив сначала находится напор с учетом скорости подхода

$$H_{01} = \left( \frac{q}{m \sqrt{2g}} \right)^{2/3},$$

а затем определяются средняя скорость на подходе к водобойной стенке

$$v_{01} = \frac{q}{\eta_{зт} h_c''}$$

и напор

$$H_1 = H_{01} - \frac{\alpha_{01} v_{01}^2}{2g}.$$

Значение коэффициента расхода  $m$  зависит от профиля водобойной стенки и ее относительных размеров и обычно для прямоугольных и трапециевидальных водобойных стенок принимается равным 0,40—0,42.

Затем определяется высота водобойной стенки и уточняется, действительно ли водобойная стенка будет неподтопленной.

Если  $p_{ст} > h_6$ , стенка не подтоплена, если  $h_6 > p_{ст}$ , т. е.  $\Delta = h_6 - p_{ст} > 0$ , и ниже стенки — надвинутый гидравлический прыжок, водобойная стенка работает как подтопленный водослив и необходимо расчет напора над гребнем водобойной стенки повторить с учетом коэффициента подтопления  $\sigma_n$ , который, как известно, зависит от  $\Delta/H_{01}$ . По найденным  $\Delta$  и  $H_{01}$  определяем  $\sigma_n$  и находим

$$H_{01}^I = \left( \frac{q}{\sigma_n m \sqrt{2g}} \right)^{2/3};$$

$$H_1^I = H_{01}^I - \frac{\alpha_1 v_{01}^2}{2g}.$$

Далее находим

$$p_{ст}^I = \eta_{э\tau} h_{с}'' - H_1^I.$$

Далее необходимо повторить уточнение напора, коэффициента подтопления и высоты водобойной стенки. Находим  $\Delta = h_6 - p_{ст}^I$  и  $\Delta/H_{01}^I$ .

По значению  $\Delta/H_{01}^I$  определяем  $\sigma_n^I$ , затем находим  $H_1^{II}$ , теперь уже с учетом значения  $\sigma_n^I$ , и, наконец,  $p_{ст}^{II} = \eta_{э\tau} h_{с}'' - H_1^{II}$  и вновь находим  $\sigma_n^{II}$ . Если  $\sigma_n^{II} \approx \sigma_n^I$ , расчет окончен. В противном случае принимаем значение коэффициента подтопления, равное получившемуся  $\sigma_n^{II}$ , и продолжаем расчет.

Если водобойная стенка — неподтопленный водослив, необходимо проверить условия сопряжения теперь уже за стенкой. Иногда за водобойной стенкой гидравлический прыжок будет отогнан, т. е.  $h_{с.ст}'' > h_6$ , где  $h_{с.ст}''$  — глубина, сопряженная со сжатой глубиной, образующейся ниже водобойной стенки  $h_{с.ст}$ . Такой случай показан на рис. 25.2. Тогда предусматривают вторую водобойную стенку с высотой, которая рассчитывается аналогично. При расчете  $\Phi(\tau_c)$  в этом случае  $E_{01} = p_{ст} + H_{01}$ , а  $\phi$  — коэффициент скорости уже для водобойной стенки. Если за второй стенкой вновь получится отогнанный гидравлический прыжок, может понадобиться и третья водобойная стенка.

Расстояние от сжатого сечения до верховой грани водобойной стенки принимается, как и в случае водобойного колодца,  $l_{ст} = 3h_{с.ст}''$ .

## 25.4. Гидравлический расчет комбинированного водобойного колодца

Комбинированный водобойный колодец, так же как и водобойный колодец, и водобойная стенка, создается для того, чтобы получить в нижнем бьефе за сооружением такую глубину, при которой сопряжение происходило бы с надвинутым гидравлическим прыжком (см. рис. 25.3).

Комбинированный водобойный колодец проектируют, когда глубина водобойного колодца слишком велика, а водобойная стенка получается слишком высокой и имеется вероятность появления за высокой водобойной стенкой отогнанного гидравлического прыжка, что ведет к необходимости возводить еще одну или несколько водобойных стенок.

Комбинированный водобойный колодец представляет собой водобойный колодец с глубиной  $d$  и установленную на выходе водобойную стенку высотой  $p_{ст}$ .

При напоре над гребнем водобойной стенки  $H_1$  глубина воды в комбинированном водобойном колодце составляет

$$\eta_{эп} h''_c = d + p_{ст} + H_1. \quad (25.18)$$

Так как не известны глубина колодца  $d$  и высота стенки  $p_{ст}$ , задаваясь значением одной из них, находим другой неизвестный параметр.

При расчете комбинированного водобойного колодца пользуются теми же положениями, что и при расчете водобойного колодца и водобойной стенки.

Часто при проектировании водобойной стенки сначала исходят из такой высоты, чтобы за нею образовывался гидравлический прыжок в сжатом сечении (предельный случай), и в этом случае водобойная стенка будет работать как неподтопленный водослив.

Следовательно, глубина в сжатом сечении за стенкой будет первой глубиной  $h'_6$ , сопряженной с бытовой глубиной. При определении  $h'_6$  следует сначала по параметру  $\Pi_{к.6}$  установить вид прыжка за водобойной стенкой. Если  $\Pi_{к.6} < 0,375$ , гидравлический прыжок — совершенный и

$$h'_6 = \frac{h_6}{2} [\sqrt{1 + 8\Pi_{к.6}} - 1].$$

Удельная энергия потока перед водобойной стенкой по отношению к дну нижнего бьефа за стенкой (без учета потерь энергии)

$$E_{01} = h'_6 + \frac{\alpha_6 v_6^2}{2g\varphi_6^2},$$

где  $h'_6$  и  $v_6$  — глубина и средняя скорость в сжатом сечении за стенкой.

Далее напор над водобойной стенкой с учетом скорости подхода

$$H_{01} = \left( \frac{q}{m \sqrt{2g}} \right)^{2/3}. \quad (25.19)$$

Высота стенки из условия сопряжения в виде гидравлического прыжка, образующегося в сжатом сечении за водобойной стенкой,

$$p_{ст} = E_{01} - H_{01}. \quad (25.20)$$

Для создания сопряжения за стенкой с надвинутым прыжком необходимо принять

$$p_{ст} < E_{01} - H_{01}.$$

Затем следует проверить, не будет ли подтопленным истечение через водобойную стенку. Если водобойная стенка окажется подтопленной, надо учесть подтопление при вычислении напора над водобойной стенкой.

Затем из (25.18) после ряда приближений находим глубину водобойного колодца. Далее вычисляем длину  $l_{кол}$ . При этом, так же как и для водобойного колодца, при расчете  $l_{кол}$  необходимо учитывать как высоту  $p$ , так и глубину колодца  $d$ .

### 25.5. Расчетный расход

Водопропускные сооружения обычно работают при расходах, изменяющихся в различных диапазонах. При изменении расхода изменяются удельная энергия потока  $E_0$ , глубины  $h_c$  и  $h_c''$ , глубина в нижнем бьефе  $h_b$  соответственно кривой связи  $Q$  с  $h_b$ , средняя скорость и  $\Pi_{к.б}$  в отводящем русле, напор при пропуске расхода через водосливы или из-под затворов, коэффициенты расхода и сжатия.

Таким образом, условия сопряжения бьефов существенно зависят от изменения расходов. Однако условия сопряжения бьефов не всегда будут наилучшими при максимальном расходе.

Для определения расчетного расхода задаются несколькими значениями  $Q$ , в каждом случае находят  $h_c''$  и  $h_b$ . За расчетный расход по И. И. Агроскину принимается расход, при котором разность  $h_c'' - h_b$  будет максимальной. Можно считать, что максимальная глубина водобойного колодца получится при максимальном значении разности  $h_c'' - h_b$ .

Бытовая глубина  $h_b$  должна определяться для суммарного расхода, поступающего в нижний бьеф через рассчитываемое сооружение и все соседние сооружения в данном створе (водосливы, плотины с затворами, водовыпуски и т. д.).

В ответственных случаях необходим расчет на расходы, составляющие 20, 40, 60, 80, 100 % максимального, и на расчетный расход, если он не равен одному из указанных расходов.

## 25.6. Применение гасителей при донном режиме сопряжения

Гашение основной части избыточной кинетической энергии (в гидравлическом прыжке) происходит в пределах водобоя. Динамическое воздействие потока на дно водобоя довольно велико, и поэтому толщина плиты водобоя назначается весьма большой. На водобое также может происходить некоторое перераспределение скоростей и удельных расходов, особенно если на водобое установлены специальные г а с и т е л и - р а с т е к а т е л и.

В пределах рисбермы (см. рис. 25.5), располагающейся непосредственно за водобоем ниже по течению, происходит дополнительное гашение избыточной энергии, перераспределение скоростей по вертикали и по ширине. К концу рисбермы поток должен придти с достаточно равномерным распределением удельных расходов по ширине и с характеристиками осредненных местных скоростей и пульсационными кинематическими характеристиками, близкими к таковым в бытовых условиях.

Из многочисленных типов гасителей энергии в нижнем бьефе гидротехнических сооружений (см. рис. 25.4) наиболее часто применяются следующие:

1) рассмотренная ранее сплошная водобойная стенка, устанавливаемая от сжатого сечения на расстоянии  $l_{ст} = 3h_c''$  (рис. 25.4, а);

2) водобойная стенка с прорезями (прорезная водобойная стенка), устанавливаемая на том же расстоянии от сжатого сечения  $l_{ст} = 3h_c''$  (рис. 25.4, б);

3) гаситель-растекатель, предложенный Д. И. Куминым, устанавливаемый на расстоянии  $l_r = 1,3 h_{кр}$  от сжатого сечения (рис. 25.4, в);

4) гаситель в виде сочетания трапецеидальных пирсов и ниже расположенной водобойной стенки (рис. 25.4, г);

5) шашечные гасители и гасители-пирсы (рис. 25.4, д—ж) (шашка-гаситель, высота которого меньше его ширины или длины; пирс-гаситель с высотой, большей ширины или длины).

Высоту и ширину гасителя, расстояние первого ряда гасителей и последующих рядов (если они имеются) от сжатого сечения, взаимное расположение гасителей (расстояние между гасителями поперек потока и вдоль него), углы наклона верховой, низовой и боковых граней гасителей принимают на основании экспериментальных исследований конкретных гасителей применительно к рассматриваемым случаям или по аналогам.

Гасители подпирают поток на водобое, вследствие чего затопление прыжка происходит при меньших глубинах, чем в отсутствие гасителей. Это уменьшение глубины может достигать до 25 %. В связи с этим поверхность водобоя может быть заглублена меньше, чем при отсутствии гасителей.

Для оценки эффективности гасителей применяется несколько критериев. Чаще используется критерий размывающей способности потока за гасителями, и лучшими считаются гасители, дающие меньшие размеры ямы размыва.

Используется также критерий уменьшения второй сопряженной глубины при наличии гасителя  $h''_{сг}$  по сравнению с  $h''_{с}$  при отсутствии гасителя.

Гасители оказывают существенное влияние на потери энергии. Благодаря гасителям в потоке создаются дополнительные водоворотные области и поверхности (зоны) раздела с большими градиентами скоростей и интенсивным турбулентным перемешиванием. Увеличение касательных напряжений приводит к более интенсивной диссипации энергии. Особенно заметен указанный эффект при установке прорезных гасителей, шашек, пирсов и т. п., так как поток расщепляется на большое количество отдельных струй, взаимодействующих друг с другом и с окружающей их частью движущейся жидкости.

Прорезные гасители (особенно шашки) способствуют трансформации низкочастотных крупномасштабных пульсаций за гасителями в менее опасные для крепления высокочастотные мелкомасштабные пульсации.

Гасители также перераспределяют скорости по вертикали, отклоняя значительную часть транзитной струи вверх, к свободной поверхности. В результате донные скорости за гасителем уменьшаются.

Приведенные выше виды воздействия гасителей на поток по Д. И. Кумину определяются как реактивное, диссипирующее и распределительное.

Гасители-расщепители способствуют расщеплению, разделению потока на отдельные струи.

Гасители-растекатели устанавливаются чаще в начале водобоя под определенными углами в плане к направлению течения, которые, как правило, не превышают  $15^\circ$ . Соответствующим размещением растекателей можно уменьшить неравномерность распределения удельных расходов по ширине, улучшить условия растекания, т. е. не допускать сбойного течения и образования водоворотных областей с вертикальной осью.

Гасители энергии подвержены силовому воздействию набегающего на них потока, которое в общем случае представлено шестью составляющими: силами  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  и моментами относительно соответствующих осей  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$ . При расчете напряженного состояния гасителя необходимо учитывать все действующие составляющие.

При определенных условиях обтекания одна из поперечных составляющих сил ( $Y$  или  $Z$ ) может быть равна нулю. При гидравлическом расчете интерес представляет горизонтальная сила лобового сопротивления  $X$ , численно равная горизонтальной проекции реакции гасителя  $R_x$ . Сила  $X$ , как известно, равна

$$X = C_x \rho s v_r^2 / 2, \quad (25.21)$$

где  $C_x$  — коэффициент лобового сопротивления гасителя;  $\rho$  — плотность жидкости;  $s$  — площадь проекции гасителя на плоскость, перпендикулярную оси  $X$ , т. е. это  $\omega_x$  (см. § 20.2);  $v_r$  — скорость потока, набегающего на гаситель.

Точнее скорость  $v_r$  должна определяться по эпюре скорости на подходе к гасителю на ее участке от дна до верха гасителя. Иногда за скорость  $v_r$  принимают скорость над гасителем. Определение  $v_r$  для различных условий и различных гасителей сложно и трудоемко. Часто за характерную скорость набегающего потока принимают среднюю скорость в сжатом сечении  $v_c = q/h_c$ , поскольку она имеет определенный физический смысл и может быть легко вычислена.

Как показывают результаты опытов, проведенных различными исследователями, коэффициент  $C_x$  гасителей зависит в общем случае от чисел Рейнольдса и Фруда, степени затопления гидравлического прыжка  $\eta_{зт} = h_6/h_c''$ , относительного расстояния от сжатого сечения до гасителя  $l_r/h_c$ , относительной глубины воды над гасителем, относительных геометрических размеров гасителей (см. рис. 25.4): относительной высоты гасителя  $p_r/h_c$ , относительной ширины гасителя  $b_r/p_r$ , относительной ширины зуба прорезной стенки  $b_r/b_{пр}$  — так называемого коэффициента разрезки ( $b_{пр}$  — ширина прорези), относительных расстояний между шашками и пирсами поперек потока и вдоль него между рядами, от углов наклона передней, задней и боковых граней и от некоторых других факторов.

Для гасителей, имеющих острые кромки, коэффициент  $C_x$  не зависит от числа  $Re = v_c p_r / \nu$  при  $Re > 10^4$  (наблюдается автоматичность  $C_x$  от  $Re$ ).

Полученные экспериментальные результаты показывают, что коэффициенты  $C_x$  гасителей увеличиваются с приближением гасителя в пределах гидравлического прыжка к сжатому сечению (т. е. с уменьшением  $l_r/h_c$ ) и с увеличением относительной высоты гасителя  $p_r/h_c$ .

Горизонтальная составляющая сила, действующая на гасители во втором ряду, характеризуется меньшими  $C_x$  при обычно принимаемых между рядами гасителей расстояниях.

С точки зрения реактивного воздействия гасителей на поток применение третьего и последующих рядов, например шашек и пирсов, является чаще всего нецелесообразным.

Приближение гасителей к сжатому сечению обычно ограничено, так как при близком расположении гасителя происходит фонтанирование воды, что нежелательно по эксплуатационным соображениям. Часто принимают  $l_{min} \approx (1,2 \div 1,5) h_c''$ . Такое расстояние до сжатого сечения характерно для близко расположенных гасителей.



После выбора типа гасителя и его геометрических размеров определяют силу  $X$  и тем самым  $R_x$ , а далее можно воспользоваться уравнением гидравлического прыжка (21.5) для определения  $h_{с.г.}^*$ .

Если необходимо запроектировать сопряжение в потоке с гасителями при второй сопряженной глубине  $h_{с.г.}^*$  (которая не равна  $h_{с.г.}^*$  без гасителей), по уравнению (21.5) находим требуемые реакции  $R_x$ . Затем подбираем гасители с такими  $C_x$  и  $s$ , которые при заданных  $v_c$  и  $\rho$  обеспечили бы получение необходимого значения реакции  $R_x$ .

Все описанное относится к обычным гасителям, работающим в условиях отсутствия кавитации, т. е. при скоростях набегающего потока не более 12—14 м/с. При возникновении кавитации на поверхности обычных гасителей давление резко понижается, характеристики силового воздействия потока на гаситель изменяются по сравнению с бескавитационным обтеканием.

Кавитация подразделяется на стадии, характеризующиеся различными значениями отношения  $\beta = K/K_{кр}$ , где  $K_{кр}$  — критический параметр кавитации, т. е. соответствующий началу появления кавитации, а  $K$  — параметр кавитации в данных условиях для рассчитываемого сооружения:

$$K = \frac{p_{хар} - p_{кр}}{\rho v_{хар}^2 / 2} = \frac{g(H_{хар} - H_{кр})}{v_{хар}^2 / 2} \quad (25.22)$$

Для гасителей первого ряда за характерную скорость  $v_{хар}$  принимают среднюю скорость в сжатом сечении  $v_c$ , а за характерное давление  $p_{хар}$  — давление, действующее на вершине гасителя:  $p_{хар} = p_{ат} + \rho gh$ , где для гасителей первого ряда [близко расположенные гасители (при  $l_r = 0,25 l_{пр}$ )] глубина  $h = (0,75 \div 0,85) (h_6 - p_r)$ .

Если гасители установлены в конце гидравлического прыжка, тогда  $h = h_6 - p_r$ .

За  $p_{кр}$  обычно принимается давление насыщенных паров воды  $p_{н.п}$  при данной температуре. Соответственно  $H_{кр} = p_{кр} / \rho g$  или  $H_{кр} = p_{н.к} / \rho g$ .

При  $K > K_{кр}$  кавитация отсутствует. Для различных гасителей в нижнем бьефе значения  $K_{кр}$  изменяются приблизительно от 1 до 2,1—2,4.

Кавитация проходит следующие стадии: начальную, развившуюся и суперкавитацию. Для плохо обтекаемых тел при начальной стадии кавитации  $\beta = 1 \div (0,7 \div 0,8)$ ; при развившейся  $\beta = (0,7 \div 0,8) \div (0,2 \div 0,1)$ ; при суперкавитации  $\beta \leq 0,2 \div 0,1$ .

### 25.7. Местный размыв в нижнем бьефе при донном режиме сопряжения

Как уже отмечалось, за рисбермами гидротехнических сооружений при размываемых грунтах оснований происходит местный размыв, создается яма размыва, постепенно увеличиваются ее глу-

бина и продольные размеры. Поскольку рассматриваем плоскую задачу, сброс расходов по фронту нижнего бьефа можно считать равномерным и, следовательно, размеры ямы размыва по всей ширине отводящего русла могут быть приняты одинаковыми.

Как правило, при донном режиме сопряжения рисбермы заканчиваются зубом (см. рис. 25.5, а) или ковшом (рис. 25.5, б).

После стабилизации процесса размыва глубина воды в яме определяется по формуле

$$h_{я.р} = K \frac{q}{v_{доп}}. \quad (25.23)$$

Удельный расход в прямоугольном отводящем русле в нижнем бьефе определяется как

$$q = \frac{Q}{hb + (n-1)b_б}, \quad (25.24)$$

где  $b$  — ширина отверстия (водосливного);  $b_б$  — ширина быка;  $n$  — количество отверстий.

Допускаемые (неразмывающие) скорости  $v_{доп}$  определяются в соответствии с указаниями, приведенными в гл. 16.

Коэффициент  $K_1$  учитывает увеличение размывающей способности потока вследствие увеличения интенсивности турбулентности в нижнем бьефе.

Глубину воды в воронке размыва в нижнем бьефе при донном режиме сопряжения можно определить по формуле К. И. Россинского

$$h_{я.р} = k_p \sqrt[1.2]{q/v_{доп}}, \quad (25.25)$$

где  $k_p$  изменяется в зависимости от конструкции концевой части рисбермы; при наличии ковша  $k_p = 1,05$ , при вертикальной стенке за короткой рисбермой  $k_p = 1,7$ ;  $v_{доп}$  — допускаемая неразмывающая скорость при глубине потока, равной 1 м.

Если грунт неоднородный, т. е.  $d_{95}/d_5 > 5$ , при размыве происходит отмостка дна более крупными частицами. Вследствие этого покрывающий поверхность дна (ямы размыва) слой из более крупных частиц предохраняет грунт от дальнейшего размыва.

При расчетах сопряжения следует учитывать возможное изменение гидравлических условий в нижнем бьефе при выходе потока за пределы сооружения в отводящее русло. При этом в более широком, чем сооружение, отводящем русле изменяется удельный расход; вследствие возможных размывов могут измениться глубины и т. п.

В нижний бьеф водохранилищ поступает осветленный поток, обладающий поэтому увеличенной способностью к размыву грунтов. При размыве поток насыщается наносами, его мутность увеличивается. При соответствующих условиях мутность потока может достичь значений, равных транспортирующей способности.

Помимо местного размыва происходит и общий размыв русла в нижнем бьефе водохранилища, понижаются отметки дна и воды в отводящем русле. При расчете необходимо учитывать и общий размыв. Подробно эти вопросы рассматриваются в курсе гидротехнических сооружений.

## 25.8. Контрольные вопросы и примеры

1. Каково назначение гасителей энергии различного вида? Назовите гасители энергии (сооружения, предназначенные для гашения энергии). Каковы их особенности?

2. Как определяется глубина водобойного колодца? Какие допущения принимаются при выводах расчетных зависимостей?

3. Как рассчитывается длина водобойного колодца?

4. Покажите, как определяется дальность падения струи, переливающейся через различные водосливы: а) в общем виде, б) через водослив с тонкой стенкой, в) через водослив с широким порогом. г) через водослив практического профиля с прямолинейным очертанием.

5. В чем заключается расчет водобойной стенки? Какие параметры определяются при этом расчете?

6. Как влияет подтопленное истечение через водобойную стенку на результаты гидравлического расчета? Поясните подробно.

7. В чем заключаются особенности комбинированного водобойного колодца? Как ведется расчет глубины колодца и высоты водобойной стенки в этом случае?

8. Что такое расчетный расход при расчете нижнего бьефа?

9. Опишите основные гасители энергии в виде отдельных конструктивных элементов. Каковы характерные черты процесса их обтекания и в чем заключается гидравлический расчет?

10. Опишите основные черты процесса кавитации при обтекании гасителей.

11. Как определяется глубина ямы размыва в нижнем бьефе при донном режиме сопряжения (местного)?

12. Как применяется формула Россинского в указанных случаях?

**Пример 25.1.** Определить глубину и длину водобойного колодца (в условиях плоской задачи) в нижнем бьефе водосливной плотины. Профиль водослива очерчен по координатам Кригера—Офицерова (рис. 25.1). Высота плотины  $p_1 = p = 15$  м; удельный расход  $q = 11,4$  м<sup>3</sup>/с/м; напор над гребнем водослива с учетом скорости подхода  $H_0 = 3,02$  м; бытовая глубина в отводящем русле в нижнем бьефе  $h_6 = 4,5$  м. Коэффициент скорости принят равным  $\varphi = 0,95$ .

*Решение.* Вначале уточним, каким будет характер сопряжения в нижнем бьефе. Найдем вторую сопряженную (со сжатой глубиной) глубину  $h'_c$  и сравним ее с бытовой глубиной  $h_6$ . В бытовых условиях в нижнем бьефе поток находится в спокойном состоянии, так как  $h_6 = 4,5$  м  $>$   $h_{кр} =$

$$= \sqrt[3]{\frac{1,1 \cdot 11,4^2}{9,81}} = 2,44 \text{ м. Имеем}$$

$$\Phi(\tau_c) = \frac{q}{\varphi E_0^{3/2}} = \frac{11,4}{0,95 (15 + 3,02)^{3/2}} = 0,157.$$

Из табл. П.25.1 при  $\varphi = 0,95$  находим  $\tau_c = 0,337$ , тогда  $h'_c = \tau'_c E_0 = 0,337 \cdot 18,02 = 6,07$  м. Так как  $h_c = 6,07$  м  $>$   $h_6 = 4,5$  м, то сопряжение в нижнем бьефе будет в форме отогнанного гидравлического прыжка. С целью

обеспечения сопряжения в форме надвинутого гидравлического прыжка рассматриваем водобойный колодец с необходимой глубиной.

Первое приближение. Найдем по (25.7) глубину водобойного колодца

$$d = \eta_{3T} h_c'' - (h_0 + \Delta z).$$

При этом по (25.4)

$$\Delta z = \frac{q^2}{2q\varphi^2 h_0^2} - \frac{\alpha_{01} q^2}{2g (h_c'')^2}.$$

Отметим, что  $V_{01} = \frac{q}{\eta_{3T} h_c''} = 1,79$  м/с.

Примем для водобойного колодца значение коэффициента скорости  $\varphi = 0,95$ ;  $\eta_{3T} = 1,05$ ;  $\alpha_{01} = 1,1$ . Тогда

$$\Delta z = \frac{11,4^2}{19,62 \cdot 0,95^2 \cdot 4,5^2} - \frac{1,1 \cdot 11,4^2}{19,62 \cdot 6,07^2} = 0,16 \text{ м};$$

$$d = \eta_{3T} h_c'' - (h_0 + \Delta z) = 1,05 \cdot 6,07 - (4,5 + 0,16) = 1,71 \text{ м}.$$

При этом удельная энергия потока в верхнем бьефе найденная по отношению к дну водобойного колодца, увеличится и будет равна

$$E_0 = p + H_0 + d = 18,02 + 1,71 = 19,73 \text{ м}.$$

Второе приближение. Вновь определяем

$$\Phi(\tau_c) = \frac{q}{\varphi E_0^{3/2}} = \frac{11,4}{0,95 \cdot 19,73^{3/2}} = 0,137.$$

Далее по табл. П.25.1 находим (при  $\varphi = 0,95$ )  $\tau_c' = 0,316$ . Тогда  $h_c' = \tau_c E_0 = 0,316 \cdot 19,73 = 6,23$  м. Определяем

$$d = \eta_{3T} h_c' - (h_0 + \Delta z);$$

$$\Delta z = \frac{11,4^2}{19,62 \cdot 0,95^2 \cdot 4,5^2} - \frac{1,1 \cdot 11,4^2}{19,62 \cdot 6,23^2} = 0,17 \text{ м}$$

и

$$d = 1,05 \cdot 6,23 - (4,5 + 0,17) = 1,77 \text{ м}.$$

Третье приближение. Принимаем  $d = 1,77$  м. Тогда

$$E_0 = p + H_0 + d = 19,79 \text{ м};$$

$$\Phi(\tau_c) = \frac{q}{\varphi E_0^{3/2}} = \frac{11,4}{0,95 \cdot 19,79^{3/2}} = 0,136;$$

$$\tau_c = 0,315; \quad h_c = 0,315 \cdot 19,79 = 6,23 \text{ м}.$$

Перепад  $\Delta z = 0,17$  и глубина колодца  $d = 1,77$  м, т. е. эта глубина получилась равной глубине водобойного колодца, которую мы приняли в третьем приближении.

Окончательно принимаем глубину водобойного колодца

$$d = 1,8 \approx 1,77 \text{ м}.$$

Длина водобойного колодца по (25.9а) равна

$$l_{\text{кол}} = 3h_c = 3 \cdot 6,23 = 18,7 \text{ м}.$$