

Гидротехническое строительство

УДК 502/504:627.83

А. П. ГУРЬЕВ

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ КОЭФФИЦИЕНТА РАСХОДА ВОДОСЛИВА ШАХТНОГО ВОДОСБРОСА ПРИ МАЛЫХ НАПОРАХ НА ГРЕБНЕ ВОДОПРИЕМНОЙ ВОРОНКИ

Представлен анализ существующих, наиболее употребляемых формул расчета пропускной способности водосливов при малых напорах и теоретические выводы коэффициента расхода шахтного водосброса при малых напорах на гребне.

Коэффициент расхода, неподтопленный водослив, шахтный водосброс.

The analysis is given on the existing most usable formulas of calculation of weir flow capacity under small heads and theoretical development of the weir flow efficiency of shaft spillway under small heads on the crest.

Weir flow efficiency, no-drowned weir, shaft weir.

Одной из главных задач гидравлических расчетов гидротехнических сооружений является определение пропускной способности водослива. Все типы водосливов рассчитываются по общей зависимости [1]:

$$Q = mb\sqrt{2g}H^{3/2}, \quad (1)$$

где m – коэффициент расхода, зависящий от конструкции водослива; b – длина водосливного фронта; $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения; H – напор на гребне водослива.

Коэффициент расхода m не поддается теоретическому определению, в связи с чем его определяют экспериментальным путем.

В практике гидротехнического строительства на водосбросных сооружениях, как правило, применяют водосливы с безвакуумными оголовками практического профиля, очертаниям которых стараются придать форму нижней поверхности струи, переливающейся через водослив с острой кромкой, или водосливы с вакуумными оголовками. Такой же характер очертания придают оголовкам шахтных водосбросов.

Коэффициент расхода неподтопленных шахтных водосбросов с оголовком практического профиля рекомендуется рассчитывать по обобщенной зависимости П. П. Мойса [2, 3]:

$$m = (0,597 - 0,136H_{np}/R)\sigma_1\sigma_2\sigma_3k, \quad (2),$$

где R – радиус водоприемной воронки; σ_1 – коэффициент, учитывающий условия подвода воды; σ_2 – коэффициент, учитывающий глубину воды перед водоприемной воронкой; σ_3 – коэффициент, учитывающий отношение фактического напора H к профилирующему напору H_{np} ; k – коэффициент, учитывающий влияние противоводоворотной конструкции в водоприемной воронке.

Коэффициент расхода водосливов с вакуумными оголовками рассчитывают по данным таблицы Н. П. Розанова в зависимости от величины эллиптичности e/r_ϕ вакуумного оголовка с учетом коэффициента неполноты напора, значение которого определяется по таблице из [4] (e – длина большой полуоси эллипса; r_ϕ – фиктивный радиус оголовка водослива).

Значения коэффициентов k неполноты напора даны П. П. Мойсом для

$H/H_{\text{пр}} \geq 0,3$. Значения коэффициентов расхода даны Н. П. Розановым для $H_o/r_{\phi} \geq 1$ и для $H/H_{\text{пр}} \geq 0,2$. Рекомендаций по определению коэффициентов расхода при меньших значениях этих параметров не имеется. В шахтных и траншейных водосбросах проектируются водосбросы автоматического действия без установки затворов на их гребне. Работа таких водосбросов начинается непосредственно после подъема уровня воды в водохранилище на величину, обеспечивающую преодоление сил поверхностного натяжения на гребне водослива. Увеличение напора с увеличением расхода влечет трансформацию гидрографа паводка, что в конечном счете определяет требуемую пропускную способность водослива.

При расчете водосбросов, работающих по схеме водосливов с острой кромкой, используются эмпирические формулы, в которых коэффициент расхода m является функцией напора H на гребне водослива. Для примера можно привести наиболее употребляемые из них.

Для водосливов без бокового сжатия: Базена [1] –

$$m = \left(0,405 + \frac{0,003}{H} \right) \cdot \left[1 + 0,55 \frac{H^2}{(H+P)^2} \right]; \quad (3)$$

Общества швейцарских инженеров –

$$m = 0,41 \left(1 + \frac{1}{1000H + 1,6} \right) \cdot \left[1 + 0,5 \frac{H^2}{(H+P)^2} \right]; \quad (4)$$

Ребока [1] –

$$m = \left(0,402 + 0,09 \frac{H + 0,0011}{P} \right) \times (H + 0,0011)^{1,5}; \quad (5)$$

Р. Р. Чугаева [5] –

$$m = 0,402 + 0,054 \frac{H}{P}. \quad (6)$$

Для водослива с боковым сжатием Эгли [1]:

$$m = \left(0,405 + \frac{0,0027}{H} - 0,03 \frac{B-b}{B} \right) \times \left[1 + 0,55 \frac{b^2}{B^2} \cdot \frac{H^2}{(H+P)^2} \right]. \quad (7)$$

В зависимостях (3)...(7) P – высота порога водослива со стороны верхнего бьефа; b – длина водослива; B – ширина верхнего бьефа перед водосливом.

По (3) и (7) имеем: при $H \rightarrow 0$ коэффициент расхода $m \rightarrow 0$, в связи с чем автором дано ограничение применения этих формул: $H < 0,05$ м, чему соответствует значение $m = 0,465$ и $0,459$. По (4) имеем: $m = 0,666$. По (5) и (6) имеем: $m = 0,402$ (Р. Р. Чугаев ограничил применение зависимости (6) напором $H = 0,1$ м). Как видим, расчет коэффициента расхода при малых напорах не имеет определенности.

Для водосливов, снабженных затворами на гребне порога водосброса, этот вопрос неактуален, поскольку в режиме свободного перелива напоры имеют большую величину. Водосбросы же автоматического действия, не оборудованные затворами для регулирования расходов, начинают работать с почти нулевыми напорами, и пропуск расчетных расходов происходит со значительной трансформацией гидрографа паводка, что влияет на величину максимального расхода и размеры водосбросного сооружения.

Рассмотрим вопрос об изменении коэффициента расхода m при уменьшении до нуля напора на гребне порога водослива. В этом случае отношение радиуса кривизны гребня порога к напору $r/H \rightarrow \infty$ и движение воды в малой области на гребне порога можно рассматривать как движение по водосливу с широким порогом. На гребне порога двумя вертикальными сечениями выделим отсек длиной ΔS и шириной $b = 1$. В начале отсека сечения глубину обозначим через h_1 , а в конце отсека – через h_2 . Уклон свободной поверхности обозначим через J . Описанная схема движения воды приведена на рис. 1.

Обозначим расход этого отсека через q . В этом случае скорость воды в первом сечении будет $v_1 = q/h_1$, а во втором сечении $v_2 = q/h_2$.

Уравнение Бернулли для этих сечений будет иметь следующий вид:

$$h_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + J \Delta S. \quad (8)$$

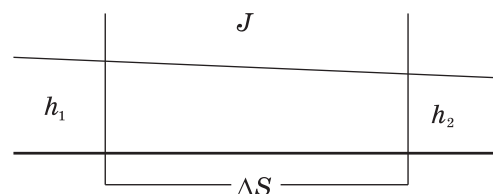


Рис. 1. Схема движения воды при малых глубинах

Коэффициенты Кориолиса можно принять равными $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$. Примем глубину во втором сечении $h_2 = kh$. Гидравлический уклон J представляет собой коэффициент потерь по длине:

$$J = \lambda \frac{v^2}{8gR}, \quad (9)$$

где λ – коэффициент гидравлического трения; R – гидравлический радиус.

Для рассматриваемого случая

$$R = h_{cp} = \frac{h_1 + h_2}{2} = h_1 \frac{1+k}{2};$$

$$v = v_{cp} = \frac{v_1 + v_2}{2} = \frac{q}{h_1} \cdot \frac{2}{k+1}.$$

В дальнейшем обозначим $h_1 = h$, с учетом чего уравнение (9) примет следующий вид:

$$h + \frac{\alpha q^2}{2gh^2} = kh + \frac{\alpha q^2}{2gk^2h^2} + \lambda \frac{q^2}{2gh^2} \cdot \frac{4}{(k+1)^2} \cdot \frac{2\Delta S}{4h(k+1)}.$$

После преобразований получаем:

$$(1-k)h + \frac{\alpha q^2}{2gh^2} \cdot \frac{1-k^2}{k^2} = \lambda \frac{q^2}{gh^3} \cdot \frac{\Delta S}{(k+1)^3}. \quad (10)$$

При уменьшении напора на гребне воронки движение воды перейдет в ламинарный режим, при котором коэффициент гидравлического трения будет определяться по выражению

$$\lambda = \frac{64}{Re} = \frac{64v}{4vh} \approx \frac{1,6 \cdot 10^{-5}}{q}, \quad (11)$$

где $v \approx 10^{-6}$ м²/с – коэффициент кинематической вязкости воды.

С учетом (11) уравнение (10) примет следующий вид (при ламинарном режиме движения $\alpha = 2$):

$$(1-k)h - \frac{q^2}{gh^2} \cdot \frac{1-k^2}{k^2} = 1,6 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{q}{gh^3} \cdot \frac{\Delta S}{(k+1)^3}. \quad (11')$$

Удельный расход q определим из уравнения расхода водослива:

$$q = m\sqrt{2gH^3}.$$

С учетом этого имеем:

$$(1-k)h - 2 \frac{H^3}{h^2} \cdot \frac{1-k^2}{k^2} m^2 = 7,22 \cdot 10^{-6} \frac{H^{3/2}}{h^3} \cdot \frac{\Delta S}{(k+1)^3} m. \quad (12)$$

Разделив все члены уравнения (12) на коэффициент при m^2 и перегруппировав их, получаем квадратное уравнение относительно коэффициента расхода m :

$$m^2 - 3,61 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{k^2 \Delta S}{(1-k) \cdot (k+1)^4 H^{3/2} h} \times \times m - \frac{k^2 h^3}{2(k+1)H^3} = 0. \quad (13)$$

Для неподтопленного режима можно принять $H = 1,5h$, с учетом чего получим:

$$m^2 - 1,965 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{k^2 \Delta S}{(1-k) \cdot (k+1)^4 h^{5/2}} \times \times m - \frac{k^5}{6,75(k+1)} = 0. \quad (13')$$

При напоре $H \rightarrow 0$ и $\Delta S \rightarrow 0$ уравнение (8) примет вид:

$$m^2 - \frac{k^5}{6,75(k+1)} = 0, \quad (14)$$

откуда получаем при $H \rightarrow 0$ и $k \rightarrow 1$ предельное значение коэффициента расхода m :

$$m = \sqrt{\frac{k^5}{6,75 \cdot (k+1)}} = \sqrt{\frac{1}{6,75 \cdot 2}} = 0,272. \quad (15)$$

Приведенные вычисления коэффициента расхода m выполнены с учетом влияния числа Рейнольдса на его величину, так что можно считать, что для соответствующих реальных условий это и есть коэффициент расхода с масштабной поправкой.

На рис. 2 приведены графики П. П. Мойса для коэффициента расхода шахтного водосброса с учетом полноты напора H/H_{np} (диапазон расчетных напоров $H_{np}/R = 0,2...0,5$) и показана аппроксимация их изменения полиномами третьей степени [2]. Эта аппроксимация позволила выполнить экстраполяцию данных до значения $H/H_{np} = 0$. Свободные члены аппроксимативных уравнений соответствуют коэффициентам расхода при напоре, стремящимся к нулю, и находятся в диапазоне 0,21...0,29.

На рис. 3 приведены графики зависимости коэффициентов расхода и полноты напора водосброса с вакуумным оголовком от относительного напора на гребне, построенные по данным Н. П. Розанова, показана аппроксимация их изменения полиномами третьей степени. Эта аппроксимация позволила выполнить

Коэффициент расхода m

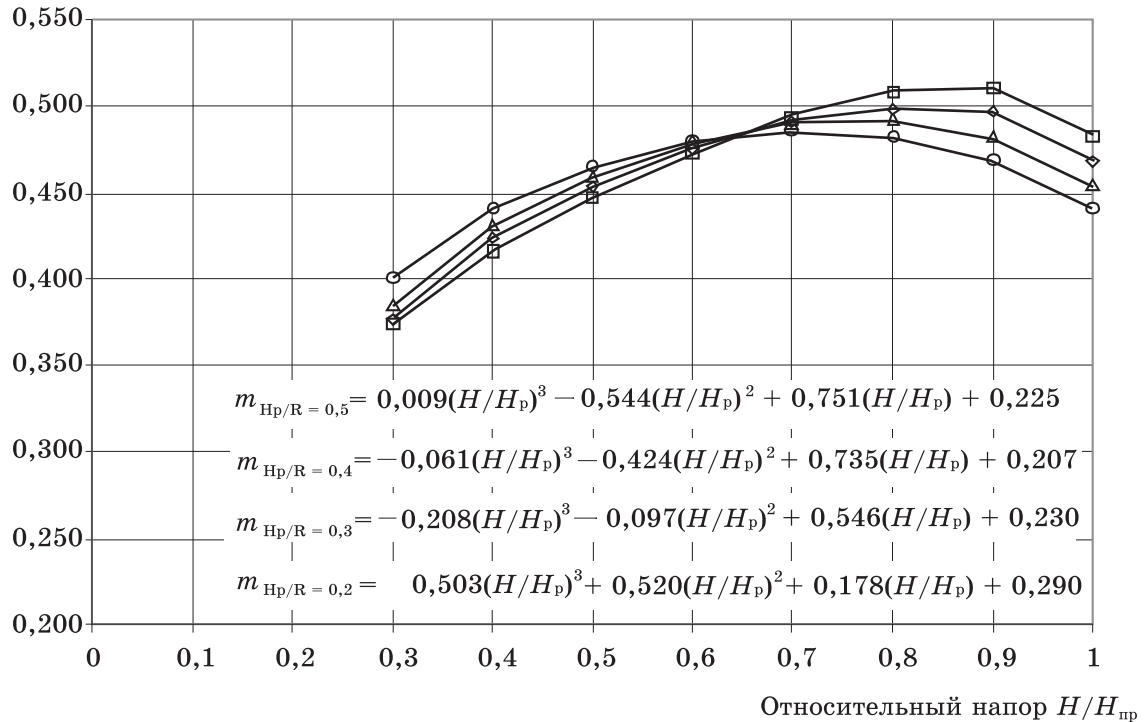


Рис. 2. Зависимость коэффициента расхода шахтного водосброса от относительного напора на гребне воронки $H/H_{пр}$ и относительного расчетного напора $H_{пр}/R$, по данным П. П. Мойса: \circ - $H_{пр}/R = 0,5$; \triangle - $H_{пр}/R = 0,4$; \diamond - $H_{пр}/R = 0,3$; \square - $H_{пр}/R = 0,2$

экстраполяцию данных до значения $H/H_{пр} = 0$. С учетом коэффициента полноты напора значения коэффициентов расхода при $H \rightarrow 0$ находятся в диапазоне значений $m_{H \rightarrow 0} = 0,775 \cdot (0,406 \dots 0,43) = 0,316 \dots 0,337$. Для водосброса практического про-

филя с круглоцилиндрическим оголовком имеется формула Ребока [6]:

$$m = 0,208 + \sqrt{0,1333 - 0,00444 \left(5 - \frac{H}{r}\right)^2} + 0,06 \cdot \frac{H}{P}. \quad (16)$$

Коэффициенты m и $k_{H/H_{пр}}$

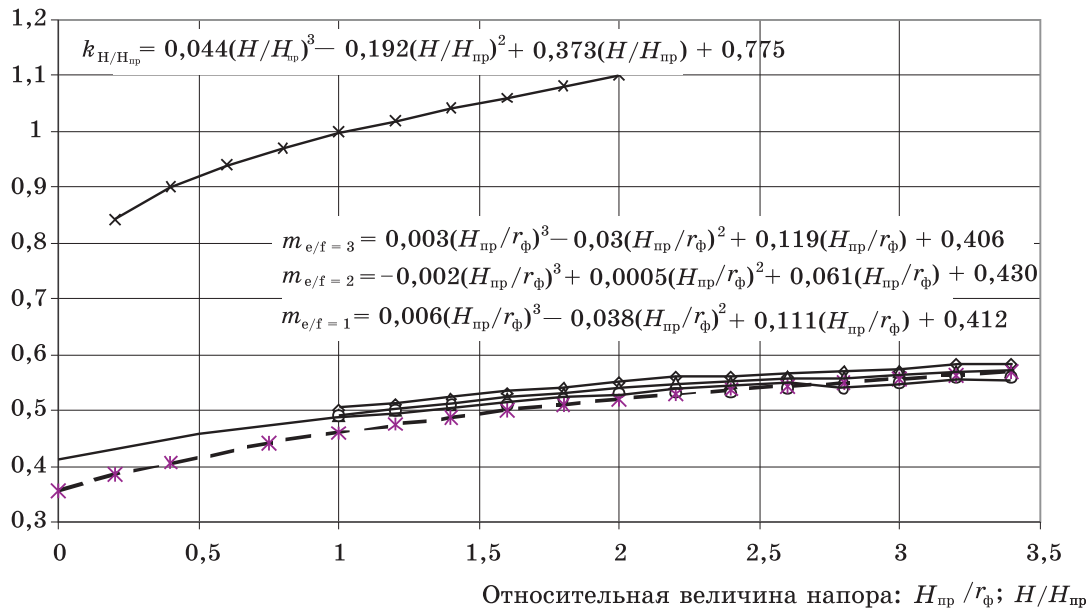


Рис. 3. Зависимость коэффициента расхода и неполноты напора водосброса с вакуумным оголовком от относительного напора на гребне, по данным Н. П. Розанова: \diamond - $e/f = 3$; \triangle - $e/f = 2$; \circ - $e/f = 1$; \times - коэффициент неполноты напора; $-\times-$ - зависимость Ребока

Зависимость Ребока (16) изменения коэффициента расхода от относительного напора H/r на гребне водослива при высоте порога $P = 5H_{пр}$ приведена на рис. 3. При $H = 0$ зависимость (16) дает значение $m = 0,357$, которое практически совпадает с величиной коэффициента расхода, полученного по данным Н. П. Розанова.

Автором были выполнены модельные гидравлические исследования шахтного водосброса полигонального поперечного сечения с круглоцилиндрическим оголовком гребня плотины [7, 8]. По дан-

ным исследований получены зависимости коэффициентов расхода водоприемной воронки при неподтопленном режиме работы для варианта свободного входа и при наличии быка со стороны верхнего бьефа. На рис. 4 показана зависимость коэффициента расхода от относительной величины напора $H/H_{пр}$ на гребне водоприемной воронки шахтного водосброса полигонального поперечного сечения со свободным входом, а на рис. 5 – зависимость коэффициента расхода водоприемной воронки, снабженной быком со стороны верхнего бьефа.

Коэффициент расхода m

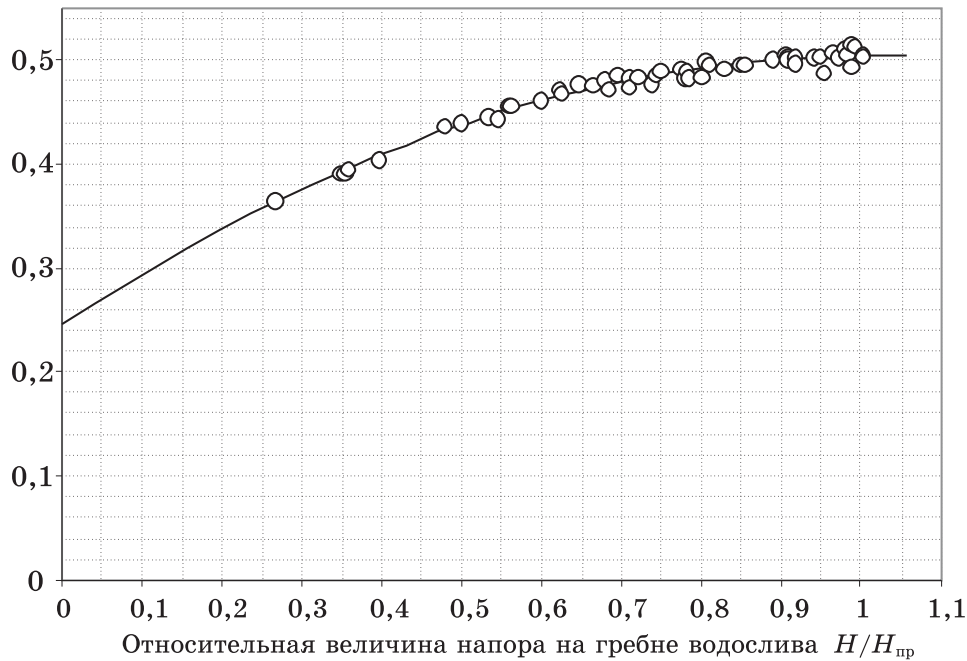


Рис. 4. Зависимость коэффициента расхода водоприемной воронки шахтного водосброса полигонального поперечного сечения со свободным входом: ○ эксперимент; — полиномиальная аппроксимация

Для возможности оценки величины коэффициента расхода при малых расходах была выполнена аппроксимация экспериментальных данных. При свободном входе хорошая аппроксимация получается уравнением

$$m = -0,25 \left(\frac{H}{H_{пр}} \right)^2 + 0,508 \frac{H}{H_{пр}} + 0,246, \quad (17)$$

а при наличии быка с верхнего бьефа уравнением

$$m = -0,15 \left(\frac{H}{H_{пр}} \right)^2 + 0,49 \frac{H}{H_{пр}} + 0,232. \quad (18)$$

Экспериментальные данные для варианта шахтного водосброса полигональ-

ного поперечного сечения с быком на водоприемной воронке были аппроксимированы также и параболической зависимостью $m = k \left(\frac{H}{H_{пр}} \right)^m$ (см. рис. 5). На рис. 5 видно, что эта аппроксимация при значениях $H/H_{пр} < 0,2$ резко отклоняется от значений экспериментальных данных, что является дополнительным свидетельством в пользу полученных значений конечной величины коэффициента расхода при малых напорах.

Значения свободного члена в аппроксимирующих зависимостях (17) и (18) коэффициентов расхода находятся в

Коэффициент расхода m

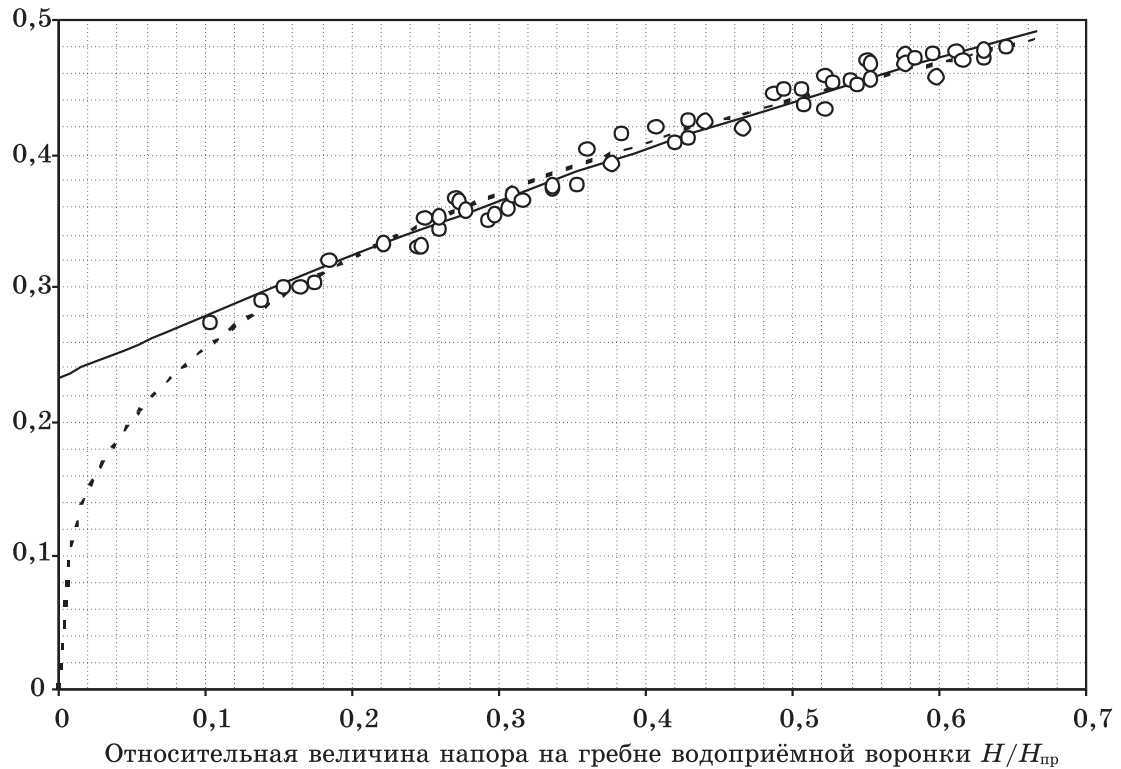


Рис. 5. Зависимость коэффициента расхода водоприемной воронки шахтного водосброса полигонального поперечного сечения, снабженного быком со стороны верхнего бьефа: \circ эксперимент; — — степенная аппроксимация; — полиномиальная аппроксимация

диапазоне значений $m_{H \rightarrow 0} = 0,246$ и $0,232$, что практически совпадает с вычисленными значениями, по данным П. П. Мойса, но несколько ниже полученного аналитически значения $m = 0,272$. Аппроксимация данных Н. П. Розанова $m_{H \rightarrow 0} = 0,316 \dots 0,337$ дает несколько большие значения.

Выводы

Эмпирические зависимости (3) и (7) для коэффициента расхода не отражают физических процессов протекания воды через прямой водослив при малых напорах.

Аналитическим путем получено предельное значение коэффициента расхода для водослива практического профиля $m_{H \rightarrow 0} = 0,272$.

Аппроксимация диапазона рекомендуемых значений для определения коэффициентов расхода прямолинейных водосливов практического профиля позволяет получить предельные значения $m_{H \rightarrow 0} = 0,316 \dots 0,337$. Зависимость (16) дает $m = 0,357$.

Экстраполяция расчетных зависимостей П. П. Мойса для шахтных водосбросов дает значения $m_{H \rightarrow 0} = 0,21 \dots 0,29$.

Экспериментальные данные позволяют получить значения $m_{H \rightarrow 0} = 0,246$ и $0,232$ для водоприемной воронки со свободным входом и снабженной быком соответственно. Эти значения находятся в диапазоне значений по расчетным зависимостям П. П. Мойса.

Можно считать, что полиномиальная аппроксимация экспериментальных значений коэффициента расхода отражает физику явления протекания воды через гребень водоприемной воронки шахтного водосброса.

1. Павловский Н. Н. Гидравлический справочник. ОНТИ-НКП-СССР. – Л.-М.: Главная редакция энергетической литературы, 1937. – 828 с.

2. Слиссский С. М. Гидравлические расчеты высоконапорных гидротехнических сооружений. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 304 с.

3. Гидравлические расчеты водосбросных гидротехнических сооружений: справочное пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 624 с.

4. Рекомендации по гидравлическому

расчету водосливов. Прямые водосливы. – Л.: «Энергия», Ленинградское отд., 1974. – 27 с.

5. **Чугаев Р. Р.** Гидравлика. – Л.: «Энергия», Ленинградское отд., 1971. – 552 с.

6. **Агроскин И. И., Дмитриев Г. Т., Пикалов Ф. И.** Гидравлика. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1954. – 484 с.

7. **Гурьев А. П.** Совершенствование конструкции шахтного водосброса //

Известия ВНИИГ имени Б. Е. Веденеева. – Т. 254. – 2009. – С. 35–44.

8. **Гурьев А. П.** Шахтный водосброс гидроузла Джедра // Известия ВНИИГ имени Б. Е. Веденеева. – Т. 255. – 2009. – С. 106–116.

Материал поступил в редакцию 23.06.10.
Гурьев Алим Петрович, кандидат технических наук, профессор кафедры «Комплексное использование водных ресурсов»
Тел. 8 (495) 471-44-72

УДК 502/504:627.5

М. А. ЕНАЛДИЕВА

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Северо-Кавказский горнометаллургический институт (СКГТУ)»

З. Г. ЛАМЕРДОНОВ

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кабардино-Балкарская государственная сельскохозяйственная академия имени В. М. Кокова»

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСНЫХ КРЕПЛЕНИЙ ДАМБ

Рассмотрен способ повышения устойчивости креплений. Приведена методика по определению коэффициента устойчивости откосного крепления. Выведено уравнение кривой, по которой предлагается делать новое крепление.

Повышение устойчивости дамб, крепление дамб, гибкое крепление дамб.

There is considered an enhancement method of aprons stability. The procedure on determination of the stability factor of slope apron is given. The equation of curvature is inferred according to which it is proposed to construct a new apron.

Enhancement of dam stability, dam apron, dams flexible apron.

Актуальным вопросом при строительстве креплений дамб является повышение устойчивости их от сползания. В результате экспериментальных исследований установлено, что устойчивость вогнутых откосных криволинейных креплений на 30...40 % выше, чем плоских, при этом наиболее оптимальным вариантом является постепенное увеличение угла поворота.

Обоснуем то, что криволинейное крепление, выполненное с постепенным увеличением угла поворота, является наиболее устойчивым от сползания [1]. В качестве примера возьмем вариант

армобутобетонного крепления, который является гибким откосным креплением [2].

Устойчивость гибкого крепления откоса от сползания можно оценить коэффициентом устойчивости, который определяется по следующей формуле [3, 4]:

$$K_y = \frac{\sum F_{уд}}{\sum F_{сдв}} \geq K_d = 1,1, \quad (1)$$

где $\sum F_{уд}$ – сумма всех сил, удерживающих гибкое крепление от сползания; $\sum F_{сдв}$ – сумма всех сил, сдвигающих гибкое крепление с откоса.

Основная сила, которая определяет состояние устойчивости крепления на