

решать задачи обеспечения безопасности населения и объектов экономики, улучшения экологического состояния водных объектов, оптимального использования природно-ресурсного потенциала прибрежного пространства для целей рационального градостроительства и восстановления окружающей среды.

Благодаря строительству объектов инженерной защиты урбанизированных территорий можно решать задачи водопользователей (расширенный диапазон попусков гидроузлов, увеличенный объем перевозок речным транспортом, добыча нерудных материалов в акватории), а также обеспечивать необходимую адаптацию поселений к возможным климатическим катаклизмам с ростом осадков и экстремальных транзитных пропусков паводков через гидроузлы.

1. Вода или нефть? / Под ред. Д. В. Козлова – М.: МППА БИМПА, 2008. – 456 с.
2. Возрождение Волги – шаг к спасению России / Под ред. И. К. Комарова. – М.: РАУ-Университет, 1999. – 384 с.
3. О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации

в 2008–2010 годах: государственные доклады. – М.: НИА-Природа, 2011. – 274 с.

4. Дебольская Е. И., Дебольский В. К. Двухмерная модель русловых деформаций в условиях формирования ледовых заторов // Гидротехническое строительство. – 2009. – № 5. – С. 41–45.

5. Краснянский Л. Н. Повышение инвестиционной активности в городском строительстве. – М.: Экономика, 2001. – 256 с.

6. Новиков В. Ю. Аспекты берегозащиты. – Рыбинск: Рыбинское подворье, 2009. – 160 с.

7. О федеральной целевой программе «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012–2020 годах»: Постановление Правительства Российской Федерации от 19.04.2012 № 350; опубл. в сборнике законодат. актов РФ за 2012 год. – № 18 (статья 2219).

Материал поступил в редакцию 19.10.12.
Новиков Виктор Юрьевич, кандидат экономических наук, помощник депутата Госдумы Федерального собрания Российской Федерации
 Тел. 8-906-075-40-11
 E-mail: viktornov111@yandex.ru

УДК 502/504:627.83

И. С. РУМЯНЦЕВ, НАНЬ ФЭН

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

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ БЕТОННЫХ ВОДОСБРОСОВ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ СО СТУПЕНЧАТОЙ СЛИВНОЙ ГРАНЬЮ

Представлены новые конструкции водосбросов с низовой сливной гранью, а также новые результаты модельных гидравлических исследований таких водосбросов, оборудованных быками различных конструкций.

Водосброс со ступенчатой сливной гранью, аэрация и гашение, бычок с расширенной кормовой частью, создающий в потоке игрек-образное течение в плане, бычок с расширенной кормовой частью, создающий в потоке икс-образное течение в плане.

There are given new designs of weirs with a downstream spillway face as well as new results of simulation hydraulic studies of such weirs equipped with spillway piers of different designs.

Weir with a stepped spillway face, aeration and energy dissipation, Y-type flaring gate piers, X-type flaring gate pier.

На протяжении нескольких последних десятилетий в строительстве речных гидроузлов получили распространение

бетонные водосбросные плотины со ступенчатой низовой сливной гранью. При этом постоянно совершенствуется не только

конструкция таких водосбросов, но и методы возведения бетонного тела таких водосбросов, их ступенчатых граней, а также быков, устраиваемых на гребне водосбросной части. Опыт гидротехнического строительства последних лет показал, что применение быков новых конструкций позволяет существенно улучшить гидравлические условия работы подобных водосбросов путем видоизменения характера течения сбросного потока как в пределах ступенчатой сливной грани, так и в водобойном колодце. Суть видоизменения состоит в следующем: с помощью трансформации жестких поверхностей кормовой части каждого из быков удастся преобразовать характер течения в конце быка и ниже его на ступенчатой грани из двумерного в трехмерное и тем самым резко интенсифицировать процессы аэрации и гашения избыточной энергии сбрасываемого потока [1]. Указанная трансформа-

ция кормовой части быка обычно сводится к ее расширению в плане либо по всей высоте, либо лишь в той части высоты быка, которая непосредственно смачивается сбросным потоком воды.

Проведенные авторами модельные гидравлические исследования позволили получить более полные сведения о гидравлических характеристиках потока на рассматриваемых участках водосброса. Тщательная проработка вариантов конструктивного оформления быков с расширенными кормовыми частями позволила выбрать из многообразия конструкций два основных варианта, получивших свои наименования в зависимости от плановой картины косых волн, возникающих за обтекаемыми кормовыми частями быков.

Одна из конструкций получила название «игрек-образный бык», другая – «икс-образный бык» (рис. 1б и 1в).

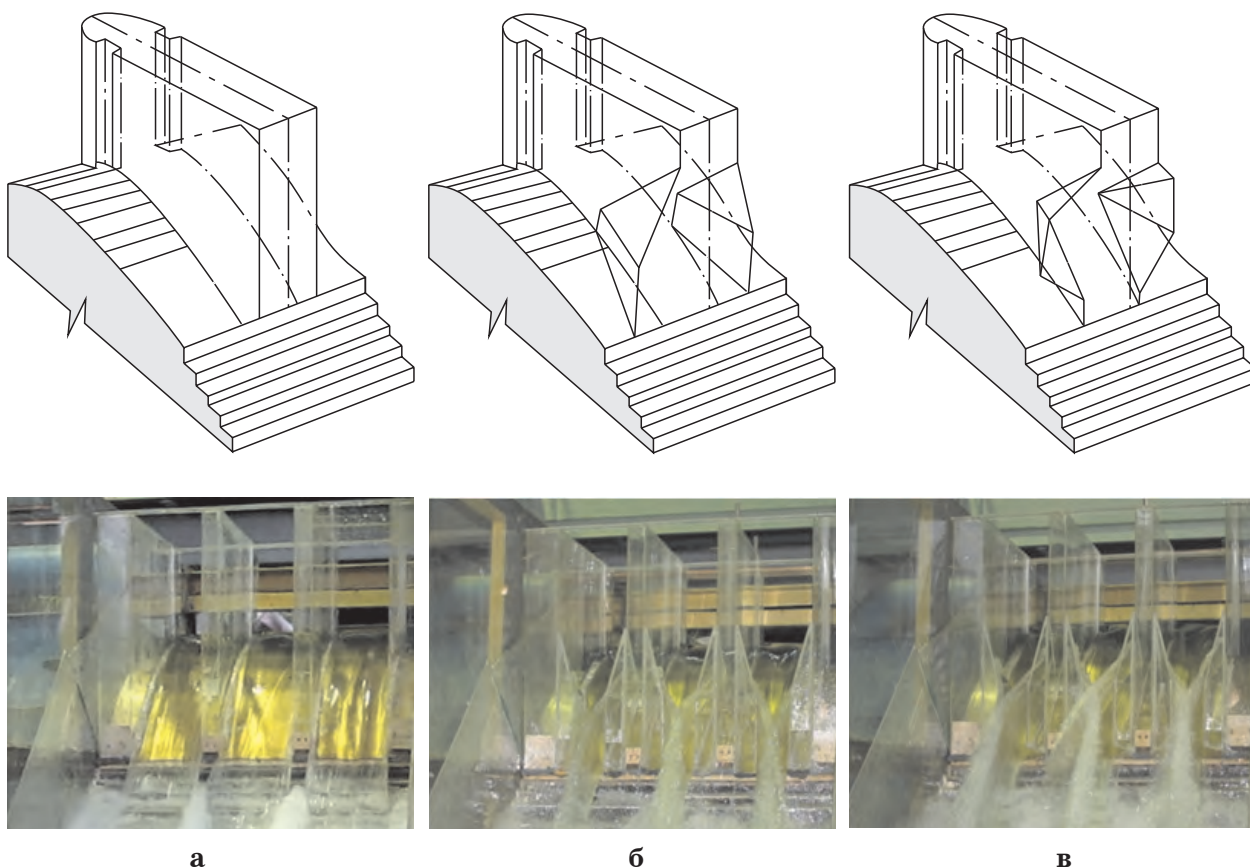


Рис. 1. Схемы и фото исследованных физических моделей водосбросов со ступенчатой нижней сливной гранью, оборудованных быками различных конструкций: а – традиционными быками; б – быками с расширенной кормовой частью, создающей игрек-образное течение ниже быка; в – быками с расширенной кормовой частью, создающей икс-образное течение ниже быка

Выполненные гидравлические исследования показали, что быки такого типа имеют определенные недостатки.

Находящиеся ниже по течению водобой испытывают повышенное давление потока, приводящее к неблагоприятным

последствиям. В связи с этим было принято решение разработать бык новой конструкции – бык с икс-образной кормовой частью [2].

Основные параметры модели: высота 196 см; угол наклона низовой (сливной) грани $\Psi = 50^\circ$; радиус, по которому очерчен оголовок водослива типа WES при профилирующем напоре, 30 см (в нашем случае при всем диапазоне исследованных расходов это позволило сохранить безвакуумный режим работы водослива); расходы меняли в диапазоне от 20 до 120 л/с и измеряли с помощью треугольного водослива. Пропуск расходов и установка уровней проведены с учетом инерционности всей системы.

Исследовали три модели водосливных плотин (см. рис. 1). Все модели представляли собой водослив типа WES со ступенчатой низовой гранью, имеющей ступени различных размеров: две первые от оголовка ступени с $d = 3,6$ см и $l = 3$ см; затем две ступени с $d = 5,52$ см и $l = 4,6$ см. Размеры остальных ступеней $d = 7,32$ см, $l = 6,1$ см, причем отношение d к l у всех ступеней равнялось 1,21. Смена же скользящего и перепадного режимов наблюдалась при $h_{кр}/d = 0,47...1,55$, длина ступени низовой грани $L_{ступени} = 2,27$ м, что практически совпало с данными других исследователей.

Пользуясь уравнением Д. Бернулли, легко показать, что для сжатого сечения справедливо равенство

$$E_0 = h_{сж} + (1 + \xi) \frac{v_{сж}^2}{2g}, \quad (1)$$

где $E_0 = P + H_0 + v_0^2/2g$ – полный напор в верхнем бьефе относительно дна нижнего бьефа; $h_{сж}$ и $v_{сж}$ – глубина и скорость в сжатом сечении.

Если обозначить коэффициент скорости φ как

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi}},$$

то можно записать (1) в виде

$$E_0 = h_{сж} + \frac{v_{сж}^2}{2g\varphi^2}. \quad (2)$$

Из-за сложности измерения глубин в сжатом сечении используем формулу сопряженных глубин:

$$h_{сж} = 0,5h_2 \left[\sqrt{1 + 8 \left(\frac{h_{кр}}{h_2} \right)^3} - 1 \right]. \quad (3)$$

Подставляя (3) в (2), можно рассчи-

тать коэффициент скорости водослива в сжатом сечении:

$$\varphi = \frac{v_{сж}}{\sqrt{2g(E_0 - h_{сж})}},$$

где E_0 – кинетическая энергия; $h_{сж}$ – глубина сжатия.

Коэффициент гашения k ступенчатого водослива можно выразить так:

$$k = \frac{E_0 - E_{сж}}{E_0},$$

где $E_{сж}$ – энергия в сжатом сечении, равная $h_{сж} + v_{сж}^2/2g$.

Потери энергии потока на ступенчатом водосбросе

$$E_0 - E_c = E_0 k = \zeta \frac{v_{сж}^2}{2g}.$$

В результате коэффициент сопротивления ступенчатого водосброса определяем так:

$$\zeta = \frac{2gE_0 k}{v_{сж}^2}.$$

Коэффициент скорости φ , коэффициент гашения k и коэффициент сопротивления ζ отражают сопротивление, которое преодолевает поток. Основными факторами, определяющими эти коэффициенты, являются удельный расход q , высота ступени d и высота водослива P .

Определение относительного удельного расхода $q = q/(g^{0,5}d^{0,5}P)$ и дальнейший анализ ведут к закономерности

$$\varphi = f(q/(g^{0,5}d^{0,5}P)).$$

В выполненных экспериментах $q = q/(g^{0,5}d^{0,5}P)$ изменялся от 0,012 до 0,072. На основании этих опытных данных были построены зависимости φ , k , ζ от $q = q/(g^{0,5}d^{0,5}P)$, которые представлены на рис. 2...4.

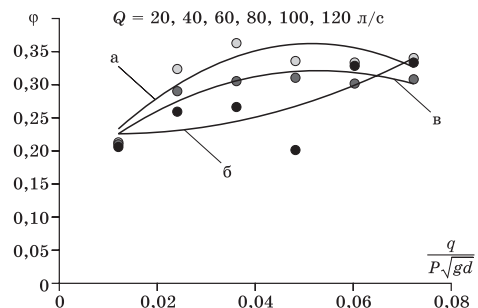


Рис. 2. Результаты опытов по изучению закономерности $\varphi = f(q/(g^{0,5}d^{0,5}P))$: а – $\varphi = -83,565(q/(P\sqrt{gd}))^2 + 8,5781q/(P\sqrt{gd}) + 0,1419$; б – $\varphi = 29,394(q/(P\sqrt{gd}))^2 - 0,6135q/(P\sqrt{gd}) + 0,2289$; в – $\varphi = -55,033(q/(P\sqrt{gd}))^2 + 5,881q/(P\sqrt{gd}) + 0,1639$

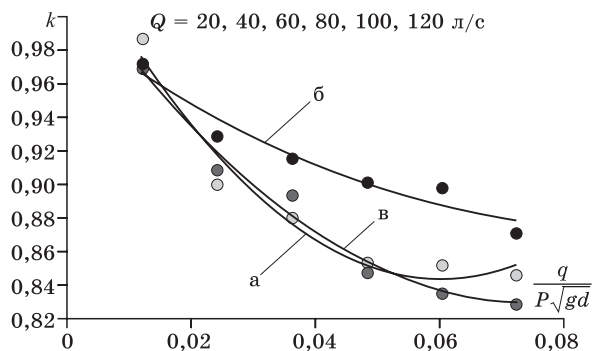


Рис. 3. Зависимость коэффициента гашения k от относительного удельного расхода $q/(g^{0,5}d^{0,5}P)$: а - $k = 58,217(q/(P\sqrt{gd}))^2 + 6,9747q/(P\sqrt{gd}) + 1,0526$; б - $k = 14,664(q/(P\sqrt{gd}))^2 - 2,6792q/(P\sqrt{gd}) + 0,9955$; в - $k = -55,033(q/(P\sqrt{gd}))^2 + 5,2622q/(P\sqrt{gd}) + 1,0264$

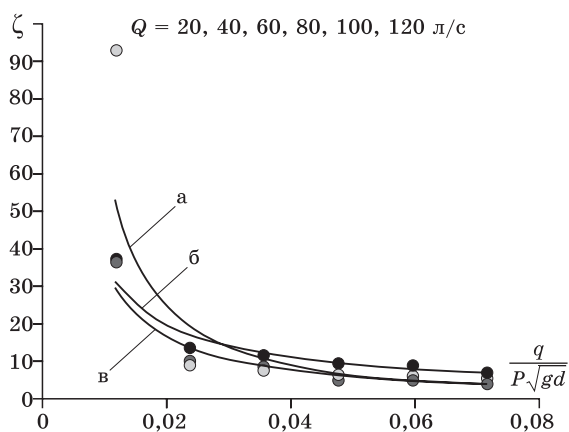


Рис. 4. Зависимость коэффициента сопротивления ζ от относительного удельного расхода $q/(g^{0,5}d^{0,5}P)$: а - $\zeta = 0,0877(q/P\sqrt{gd})^{-1,449}$; б - $\zeta = 0,7888(q/P\sqrt{gd})^{-0,834}$; в - $\zeta = 0,234(q/P\sqrt{gd})^{-1,1}$

При рассмотрении этих графиков можно обнаружить несколько закономерностей изменения величин названных коэффициентов.

При исследовании всех моделей по мере увеличения расхода кривая $\varphi = f(q/(g^{0,5}d^{0,5}P))$ имеет восходящий характер, т. е. величины φ возрастают, а кривые $k = f(q/(g^{0,5}d^{0,5}P))$ и $\zeta = f(q/(g^{0,5}d^{0,5}P))$ имеют нисходящий характер, т. е. величины сокращаются.

Наибольшее значение φ , т. е. наиболее высокое местоположение кривой $\varphi = f(q/(g^{0,5}d^{0,5}P))$ имеет водосброс (модель а на рис. 1), т. е. водосброс с традиционными быками со ступенчатой сливной гранью, ниже расположена кривая водо-

сброса (модель в на рис. 1) с быками, имеющими икс-образное кормовое расширение потока на ступенчатой сливной грани, еще ниже – кривая водосброса (модель б на рис. 1) с быками, имеющими игрек-образное кормовое расширение на ступенчатой сливной грани. Это говорит о том, что водосброс типа 1б наиболее интенсивно гасит избыточную кинетическую энергию потока.

Кривые $\varphi = f(q/(g^{0,5}d^{0,5}P))$ водосбросов (модели б и в) подтвердили ускорение трансформации потока за быками из двухмерного в трехмерный, когда такое сужение приводит к местному увеличению глубин и одновременной интенсивной аэрации потока, защищающей рабочие поверхности сливной грани от кавитационной эрозии.

Характерной особенностью водосброса с быками, создающими икс-образное кормовое расширение потока, является то, что малые расходы проходят по полной ширине пролета водосброса с использованием проточных каналов, устроенных в нижней части кормового расширения (модель в на рис. 1).

Кривые $k = f(q/(g^{0,5}d^{0,5}P))$ и $\zeta = f(q/(g^{0,5}d^{0,5}P))$, расположенные на рисунках 3 и 4, показали тот же принцип формирования потерь энергии на ступенчатых сливных гранях водосбросов.

Во всех исследованных водосбросах кривые коэффициентов в опытах с моделями а, в находились гораздо ближе. Наибольшее гашение избыточной энергии наблюдалось на водосбросах типа б.

На рис. 5 представлены результаты опытов, показавших, как значения относительного коэффициента расхода $m/m_{тео}$ зависят от отношения $H/H_{про}$ т. е.

$$m/m_{тео} = f(H/H_{про}),$$

где m – фактическое значение коэффициента расхода из формулы

$$Q = m\sigma_s B\varepsilon\sqrt{2gH_0^{3/2}},$$

где B – ширина пролета.

Последнюю формулу можно переписать в следующем виде:

$$m = \frac{Q}{\sigma_s B\varepsilon\sqrt{2gH_0^{3/2}}},$$

где σ_s – коэффициент подтопления, $\sigma_s = 1$; $B = nb$; n – число пролетов, $n = 3$; b – ширина водосливного отверстия (пролета) в свету, $b = 0,23$ м; H_0 – напор с учетом скорости подхода, $H_0 = H + v_0^2/2g$; $H_0 \approx H$; ε – коэффициент сжатия;

$$\varepsilon = 1 - 0,2[\zeta_k + (n-1)\zeta_0] \frac{H_0}{nb},$$

где ζ_k ; ζ_0 – коэффициенты, учитывающие формы устоев и быков ($\zeta_k = 0,7$; $\zeta_0 = 0,3$); H_0 – напор с учетом скорости подхода.

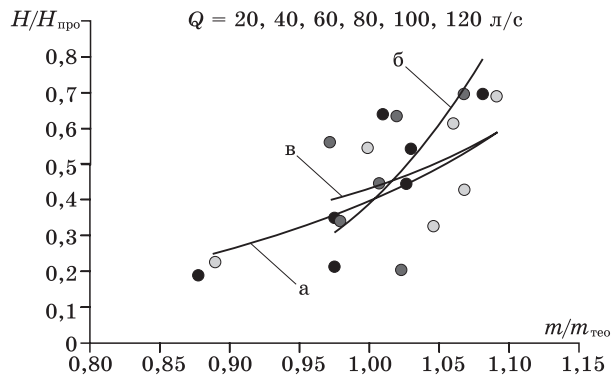


Рис. 5. Зависимость коэффициента относительного расхода $m/m_{тео}$ от относительного напора $H/H_{про}$: а – $H/H_{про} = 0,0055e^{(4,291m/m_{тео})}$; б – $H/H_{про} = 6 \cdot 10^{-5}e^{(8,8136m/m_{тео})}$; в – $H/H_{про} = 0,0214e^{(3,0103m/m_{тео})}$

Исследования [3] показали, что $m_{тео}$ (теоретическое значение коэффициента расхода) можно определить из зависимости

$$m_{тео} = 0,385 + 0,149 \cdot \frac{H_0}{H_d} - 0,04 \left(\frac{H_0}{H_d} \right)^2 + 0,004 \left(\frac{H_0}{H_d} \right)^3,$$

где H_d – расчетный (профилирующий) напор; $H_d = H_{про} = 0,3$ м; $H_0 = H + v_0^2/2$; $H/H_d = 0...1,8$; $H_0 \approx H$.

Кривые $m/m_{тео} = f(H/H_{про})$, представленные на рисунке 5, показывают тот же принцип пропускной способности потока на ступенчатых водосбросах.

При исследовании всех моделей по мере увеличения расхода кривая $m/m_{тео} = f(H/H_{про})$ имеет восходящий характер, т. е. величины $m/m_{тео}$ возросли.

Наибольшее значения $m/m_{тео}$, т. е. наиболее высокое местоположение кривой $m/m_{тео} = f(H/H_{про})$ имел водосброс с быками с игрек-образным кормовым расширением со ступенчатой сливной гранью (модель б на рис. 1). Ниже располагалась кривой водосброс с быками с икс-образным кормовым расширением со ступенчатой сливной гранью (модель в на рис. 1). Еще ниже – кривой водосброс, т. е. водосброс с традиционными быками со ступенчатой сливной гранью (модель а на рис. 1). Во всех исследованных водосбросах кривые названных коэффициентов в опытах с моделями а и в находились гораздо ближе.

Водосброс (модель а) наиболее интенсивно сбросит пропускную способность потока.

Выводы

Наиболее интенсивно гасит избыточную кинетическую энергию сбросного потока водосброс со ступенчатой сливной гранью и быками с расширением кормовой части, создающей игрек-образное течение ниже быка.

Аналогичный водосброс, но с быками, имеющими икс-образное течение за ними, более интенсивно гасит избыточную кинетическую энергию, чем в случае применения традиционных быков, одновременно обеспечивая наиболее высокую пропускную способность.

Аналогичный водосброс с быками традиционной конструкции позволяет обеспечивать самую высокую пропускную способность сооружения за счет более высоких значений коэффициентов расхода.

1. Guo J., Zhiping L., Jiguang L., Lu Y., Lei S. Prototype Observation of the Flaring Pier Stepped Dam Face Flood Discharging Hydraulics for the Dachaoshan Hydropower Plant // Yunnan Water Power. – 2002. – Vol 18. – №. 4. – P. 16–20.

2. Liang Z., Yin J., Zheng Z., Lu H., Gong H. Study on the method for style designing of X type flaring gate piers // Journal of Northwest A&F University. – 2008. – Vol. 36. – № 5. – P. 206–218.

3. Zhao J., Zhe J. Hydraulics // China WaterPower Press. – 2007. – P. 215–218.

Материал поступил в редакцию 14.01.13.

Румянцев Игорь Сменович, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, заведующий кафедрой «Гидротехнические сооружения»

Тел. 8 (499) 976-24-60

E-mail: rumyantsev.rumi@yandex.ru

НаньФэн, магистр техники и технологий, аспирант

Тел. 8 (965) 422-71-46

E-mail: nanfeng@yandex.ru