

УДК 502/504:627.8

И. С. РУМЯНЦЕВ, НАНЬ ФЭН

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

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ РАБОТЫ БЕТОННЫХ ВОДОСБРОСОВ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ С НИЗОВОЙ СТУПЕНЧАТОЙ СЛИВНОЙ ГРАНЬЮ

Представлены различные конструкции водосбросов практического профиля со ступенчатой низовой сливной гранью, а также приведены новые результаты модельных гидравлических исследований таких водосбросов.

Водосброс со ступенчатой низовой сливной гранью, кинетическая энергия, водослив практического профиля.

There are presented different structures of ogee spillways with a stepped downstream face as well as new results of model hydraulic tests of such weirs.

Spillway with a stepped downstream face, kinetic energy, round-crested weir.

Водосбросные плотины со ступенчатой низовой сливной гранью известны не одну тысячу лет. Такая конструкция водосбросов успешно решает задачи совмещения сооружений и гашения избыточной энергии потока в нижнем бьефе. В последние десятилетия водосбросные плотины со ступенчатыми низовыми сливными гранями находят все более широкое применение в мировой гидротехнике благодаря прогрессу технологии возведения их тела из укатанного бетона (РСС).

Проведенная авторами работа была направлена на изучение гидравлических условий работы высокопороговых водосбросных плотин отмеченных конструкций для расширения их использования в практике гидротехнического строительства. Модели исследованных бетонных высокопороговых плотин имели разную высоту тела: 170 см (вакуумный водослив практического профиля, поперечное сечение которого было выполнено по координатам, рекомендованным Н. П. Розановым, СССР), 192 см (безвакуумный

водослив практического профиля, построенного по координатам Кригера–Офицера, СССР), 196 см (безвакуумный водослив практического профиля, очерченного по координатам WES, США). Все модели были выполнены в масштабе 1:60.

Для удовлетворения условий работы оголовка водослива в вакуумном режиме значение очертаний его «фиктивного радиуса» устанавливалось в соответствии с рекомендациями Н. П. Розанова, т. е. при расходе $Q \geq 100$ л/с отношение составляло $H_0/r_\phi \approx 1,2 \dots 3,4$ (H_0 – напор с учетом скорости подхода; r_ϕ – фиктивный радиус, равный 0,1 м), эллиптический оголовок с вакуумным профилем с отношением полуосей эллипса $a/b = 1$ (модель *a* на рис. 1...4). При построении очертаний поперечного сечения водослива по координатам Кригера–Офицера его профилирующий (расчетный) напор был равен 30 см (модель *b* на рис. 1...4) [1].

При построении очертаний поперечного сечения водослива по координатам WES его координаты были определены

при расчетном (профилирующем) напоре 30 см. Проектировали такой профиль по формуле $x^{1,85} = 2H^{0,85}y$ (H – расчетный напор; x и y – горизонтальная и вертикальная оси соответственно, проведенные из центра на гребне водосброса) (модель в на рис. 1...4) [2].

Угол наклона низовой (сливной) грани $\Psi = 47^\circ$. Водосбросы со ступенчатой низовой гранью имели ступени различных размеров: две первые от оголовка – высоту $d = 3,6$ см и ширину $l = 3$ см; затем две ступени с $d = 5,52$ см и $l = 4,6$ см. Остальные ступени имели размеры $d = 7,32$ см, $l = 6,1$ см, причем отношение d/l у всех ступеней равнялось 1,21. Смена скользящего и перепадного режимов наблюдалась при $h_{кр}/d = 0,47...1,55$, длина ступени низовой грани составляла $L_{ступени} = 2,27$ м, что практически совпало с данными других исследователей. Расходы менялись в диапазоне от 20 до 120 л/с (модели б и в при расходе 20, 40, 60, 80, 100, 120 л/с; модель а при расходе 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200 л/с) и измерялись с помощью треугольного водослива. Пропуск расходов и установка уровней проводились с учетом инерционности всей системы.

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 соответственно.

Если обозначить коэффициент скорости ϕ как

$$\phi = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi}}, \quad (2)$$

то (1) можно записать в следующем виде:

$$E_0 = h_{сж} + \frac{v_{сж}^2}{2g\phi^2}. \quad (3)$$

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

$$h_{сж} = 0,5h_2 \left[\sqrt{1 + 8 \left(\frac{h_{кр}}{h_2} \right)^3} - 1 \right]. \quad (4)$$

Подставляя (4) в (3), можно рассчитать коэффициент скорости водослива в сжатом сечении:

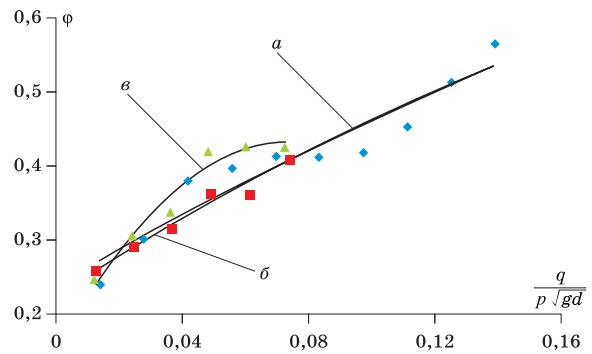


Рис.1. Результаты опытов по изучению закономерности $\phi = f(q/(g^{0,5}d^{0,5}p))$

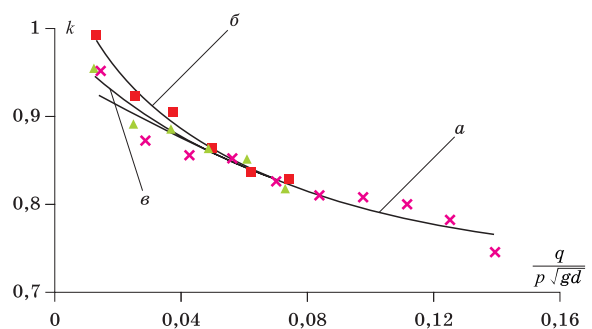


Рис.2. Зависимость коэффициента гашения k от относительного удельного расхода $q/(g^{0,5}d^{0,5}p)$

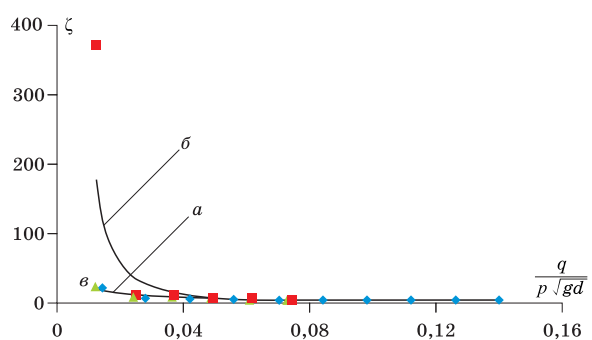


Рис.3. Зависимость коэффициента сопротивления ζ от относительного удельного расхода $q/(g^{0,5}d^{0,5}p)$

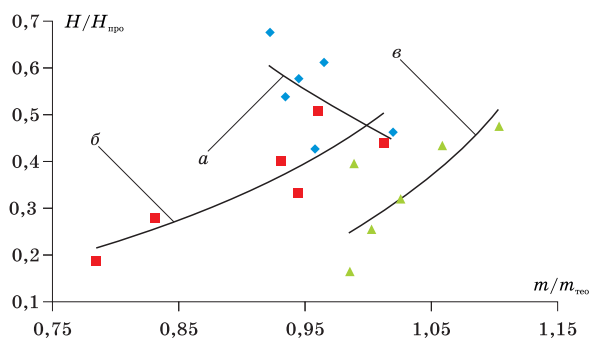


Рис. 4. Зависимость коэффициента относительного расхода $m/m_{тео}$ от относительного напора $H/H_{про}$ для опытов, выполненных на моделях а, б, в

$$\varphi = \frac{V_{сж}}{\sqrt{2g(E_{0сж} - h)}} \quad (5)$$

Коэффициент гашения k ступенчатого водослива

$$k = \frac{E_{0сж} - E}{E_0} \quad (6)$$

где $E_{сж}$ – энергия в сжатом сечении $h_{сж} + \frac{V_{сж}^2}{2g}$.

Потери энергии потока на ступенчатом водосбросе можно выразить так:

$$E_0 - E_c = E_0 k = \zeta \frac{V_{сж}^2}{2g} \quad (7)$$

Коэффициент сопротивления ступенчатого водосброса

$$\zeta = \frac{2gE_0k}{V_{сж}^2} \quad (8)$$

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 $\bar{q} = q / (g^{0.5} d^{0.5} p)$ и дальнейший анализ позволяют выразить коэффициент φ через отношение: $\varphi = f(q / (g^{0.5} d^{0.5} p))$. (9)

В выполненных экспериментах $\bar{q} = q / (g^{0.5} d^{0.5} p)$ изменялся от 0,012 до 0,072. На основании этих опытных данных были построены зависимости φ, k, ζ от $\bar{q} = q / (g^{0.5} d^{0.5} p)$, которые представлены на рисунках 1...3. Графики позволили обнаружить несколько закономерностей изменения величин перечисленных 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 увеличиваются, 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 уменьшаются.

Наибольшее значения φ , т. е. наиболее высокое местоположение кривой $\varphi = f(q / (g^{0.5} d^{0.5} p))$ имел водосброс (модель *в*) со ступенчатой низовой гранью с безвакуумным оголовком, построенным по координатам WES. Ниже – кривая водосброса (модель *а*) со ступенчатой низовой гранью с вакуумным оголовком по координатам, рекомендуемым Н. П. Розановым, а ниже всех располагалась кривая водосброса (модель *б*) со ступенчатой ни-

зовой гранью с безвакуумным оголовком (по координатам Кригера–Офицерова). Это говорит о том, что водосброс типа *б* (модель *б*) наиболее интенсивно гасил избыточную кинетическую энергию потока.

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 2 и 3, показали тот же принцип формирования потерь энергии на ступенчатых сливных гранях водосбросов. Во всех исследованных водосбросах кривые коэффициентов в опытах с моделями *а, б, в* находились гораздо ближе при расходе больше 80 л/с. Наибольшее гашение избыточной энергии наблюдалось на водосбросах типа *б* (модель *б*).

На рисунке 4 представлены результаты опытов, показавших, как значения относительного коэффициента расхода практического профиля $m / m_{тео}$ зависят от отношения $H / H_{про}$:

$$m / m_{тео} = f(H / H_{про}) \quad (10)$$

где m и $m_{тео}$ – фактическое и теоретическое значения коэффициентов расхода из формулы

$$Q = m \sigma_s B \sqrt{2gH_0^{3/2}}, \quad (11)$$

которую можно представить в виде

$$m = \frac{Q}{\sigma_s B \sqrt{2gH_0^{3/2}}}, \quad (12)$$

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

Исследования показали, что теоретическое значение коэффициента расхода для вакуумного оголовка $m_{тео}$ можно определить из соотношения H_0 / r_ϕ и полуосей эллипса a/b (с увеличением обеих относительных величин) (таблица) [1].

Теоретическое значение коэффициента расхода

H_0	H_0 / r_ϕ	Коэффициент расхода $m_{тео}$ при $a/b = 1$
0,130	1,30	0,5015
0,140	1,40	0,5060
0,163	1,63	0,5130
0,175	1,75	0,5210
0,186	1,86	0,5240
0,205	2,05	0,5260

Исследования показали, что $m_{тео}$ для безвакуумного оголовка по координатам

Кригера–Офицера можно определить так:

$$m_{\text{тео}} = 0,504\sigma_{\phi}\sigma_{\text{н}}, \quad (13)$$

где $m = 0,504$ – коэффициент расхода водослива, построенного по координатам Кригера–Офицера, принятый по опытному данным А. С. Офицера; $\sigma_{\phi} = 1$ – коэффициент формы, учитывающий влияние особенностей геометрии профиля; $\sigma_{\text{н}}$ – коэффициент полноты напора, учитывающий влияние изменения напора H по сравнению с $H_{\text{про}}$.

При $\theta_{\text{в}} = 90^{\circ}$ $\sigma_{\text{н}}$ можно найти также по формуле, предложенной Н. П. Розановым:

$$\sigma_{\text{н}} = 0,62 + 0,38\sqrt{H/H_{\text{про}}}. \quad (14)$$

Исследования показали, что $m_{\text{тео}}$ для безвакуумного оголовка по координатам WES можно определить из следующей зависимости [2]:

$$m_{\text{тео}} = 0,385 + 0,149\frac{H_0}{H_d} - 0,04\left(\frac{H_0}{H_d}\right)^2 + 0,004\left(\frac{H_0}{H_d}\right)^3, \quad (15)$$

где H_d – расчетный (профилирующий) напор; $H_d = H_{\text{про}} = 0,3$ м.

Кривые $m/m_{\text{тео}} = f(H/H_{\text{про}})$, представленные на рисунке 4, показывают тот же принцип пропускной способности потока на ступенчатых водосбросах.

При исследовании моделей *б* и *в* по мере увеличения расхода кривая $m/m_{\text{тео}} = f(H/H_{\text{про}})$ имеет восходящий характер, т. е. величины $m/m_{\text{тео}}$ увеличиваются, а модель *а* имеет нисходящий характер, т. е. величины $m/m_{\text{тео}}$ уменьшаются.

Наибольшие значения $m/m_{\text{тео}}$, т. е. наиболее высокое местоположение кривой $m/m_{\text{тео}} = f(H/H_{\text{про}})$ имел водосброс модели *а* со ступенчатой низовой гранью с вакуумным оголовком по координатам, рекомендуемым Н. П. Розановым, потому что на нем были пропущены большие расходы (от 100 до 200 л/с), чем на моделях *б* и *в* (от 20 до 120 л/с). Кроме того, кривая модели *а* имела нисходящий характер, потому что при таком большом расходе вакуумный режим и пропускная способность уменьшались, а в верхнем бьефе появилась неравномерная волна типа волнистого прыжка.

В диапазоне $0,1 \leq H/H_{\text{про}} \leq 0$ наибольшее значение $m/m_{\text{тео}}$, т. е. наиболее высокое местоположение кривой $m/m_{\text{тео}} = f(H/H_{\text{про}})$ имел водосброс модели *в* – водосброс со ступенчатой низовой гранью с безвакуумным профилем, очерченным по координатам WES. Ниже располагалась

кривая водосброса модели *б* со ступенчатой низовой гранью с безвакуумным поперечным сечением, выполненным по координатам Кригера–Офицера.

Выводы

Наиболее интенсивно избыточную кинетическую энергию сбросного потока гасит водосброс со ступенчатой низовой гранью, поперечное сечение которого очерчено по координатам Кригера–Офицера (модель *б*).

Водосброс со ступенчатой низовой гранью с вакуумным оголовком, поперечное сечение которого построено по координатам, рекомендованным Н. П. Розановым (модель *а*), при больших расходах имеет меньшую пропускную способность (в верхнем бьефе появляется неравномерная волна типа волнистого прыжка).

Аналогичный водосброс (модель *в*), т. е. водосброс со ступенчатой низовой гранью с безвакуумным оголовком, тело которого очерчено по координатам WES, позволяет обеспечивать самую высокую пропускную способность сооружения за счет более высоких значений коэффициентов расхода.

Анализ, выполненный авторами, показал, что водосбросы практического профиля имеют следующие характеристики:

водосбросы, тело которых проектировали по координатам Кригера–Офицера, имеют больший объем бетона и меньшую пропускную способность, чем водосбросы, выполненные по координатам WES;

водосбросы, выполняемые по методу WES, проще проектировать и строить. Видимо, из-за этих двух обстоятельств они нашли более широкое распространение в практике гидротехнического строительства КНР и США;

водосбросы с вакуумными оголовками имеют определенные ограничения действующим напорам и поэтому пока применяются относительно редко, хотя и более экономичны с точки зрения объема их бетонного тела.

1. Штеренлихт Д. В., Гидравлика: учебник для вузов. – М: Энергоатомиздат, 1984. – 640 с.

2. Jiandong Zhao, Jianlun Zhe. Hydraulics [M]. – China: Water Power Press, 2007. – P. 215–218.

Материал поступил в редакцию 15.05.13.
Румянцев Игорь Сменович, доктор технических наук, профессор, заслуженный

деятель науки РФ, заведующий кафедрой
«Гидротехнические сооружения»
Тел. 8(499)976-24-60
E-mail: rummyantsev.rumi@yandex.ru

Нань Фэн, магистр техники и технологий,
аспирант
Тел. 8(965)422-71-46
E-mail: nanfeng@yandex.ru

УДК 502/504:627.82.034.93

А. М. СИЛКИН, В. Я. ЖАРНИЦКИЙ, А. В. САВЕЛЬЕВ

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

ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ ГРУНТОВ НА ПРОХОДИМОСТЬ МАШИН

Рассматриваются вопросы нарушения проходимости строительной техники по торфяной залежи, оценки несущей способности и возможности работы машин на торфяной залежи. Приводится обоснование результатов штамповых испытаний образцов торфов.

Проходимость, движитель, коэффициент динамичности, частота колебаний, угол внутреннего трения грунта, удельное сцепление грунта, критическая нагрузка, тиксотропность, динамическое и вибрационное воздействие, торф, степень разложения, степень зольности, несущая способность, очес, чати.

There are considered questions of passability failing of the building machinery on the peat deposit, assessment of the bearing capacity and possibility of the machinery operation on the peat deposit. Substantiation of the stamp tests results of peat patterns is given.

Passability, drive, dynamic factor, oscillation frequency, angle of the soil internal friction, soil specific adhesion, critical load, thixotropy, dynamic and vibration impact, peat, degree of decomposition, degree of ash content, bearing capacity, tow, chats.

Проходимость машин называют их способность перемещаться из пункта А в пункт Б. Проходимость машины зависит от ее характеристики: гусеничный или колесный движитель; цикличного или непрерывного действия (работы) машина; численное значение статистической нагрузки, передаваемой машиной на грунт, по которому она перемещается; коэффициент динамичности и частота колебаний динамической нагрузки. Проходимость машины зависит и от свойств грунта, по которому она перемещается.

Грунты, подразделяются на три класса: скальные, дисперсные и мерзлые [1]. Рассмотрим влияние дисперсных грунтов на проходимость машин: минеральных – влияние глинистых грунтов и биогенных – влияние торфов.

Глинистые грунты – глины, суглинки и супеси – в зависимости от количества воды, содержащейся в них, могут находиться в твердом, пластичном и текучем состоянии.

Все *глинистые грунты, находящиеся в твердом состоянии*, являются хорошим основанием (допустим такой термин) для любых движителей любых машин, а следовательно,

не являются препятствием с точки зрения проходимости машин (влияние рельефа местности здесь и далее не рассматривается).

Глинистые грунты, находящиеся в текучем состоянии, с точки зрения проходимости машин непригодны. Они имеют низкую прочность (несущую способность) или совсем ее не имеют.

Глинистые грунты, находящиеся в пластичном состоянии, обладают несущей способностью. При этом чем меньше влажность, тем выше несущая способность. Пределом несущей способности минерального грунта является вторая критическая нагрузка [2].

Имея показатель прочности грунта φ (угол внутреннего трения грунта) и c (удельное сцепление грунта), вторую критическую нагрузку P_{2cr} можно определить по следующей формуле:

$$P_{2cr} = (c \cdot \operatorname{ctg} \varphi) \cdot \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \cdot e^{\pi \varphi \operatorname{tg} \varphi} - c \cdot \operatorname{ctg} \varphi, \quad (1)$$

где c – удельное сцепление грунта, кПа; φ – угол внутреннего трения грунта, град; e – константа ($e = 2,72$); π – константа ($\pi = 3,14$).