

УДК 502/504:627.83:532

Н. Н. РОЗАНОВА, ЧЭНЬ ЯНЬ ФЭЙ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ СТУПЕНЧАТОЙ ВОДОСЛИВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ВОДОСБРОСОВ

Приведены данные по эксплуатации водосбросов со ступенчатой водосливной поверхностью. Отмечается, что главной особенностью работы водосбросов со ступенчатой водосливной поверхностью является формирование самоаэрируемого потока. Рассмотрено рациональное использование водосброса с допустимым удельным расходом и при условии отсутствия кавитационной эрозии на ступенчатой поверхности. Анализируется вероятность появления кавитационной эрозии на ступенчатых водосбросах Богучанского гидроузла в России и Дань Цзянкоу в КНР. Получены значения коэффициента гидравлического трения ступенчатой поверхности при больших уклонах водосливной грани. Результаты расчетов показали, что наличие воздуха в турбулентных пограничных слоях уменьшает сдвиговые напряжения между слоями потока и приводит к уменьшению сопротивления и коэффициентов гидравлического трения. Показано, что учет пороговых скоростей потока расширяет область применения водосбросов со ступенчатой водосливной поверхностью.

Аэрация, ступенчатый водосброс, кавитация, коэффициент гидравлического трения.

There are given the data on operation of spillways with a stepped weir surface. It is marked that the main feature of spillways operation with a stepped weir surface is formation of a self-aerated current. The rational usage of spillway is considered with a permissible unit discharge and under the condition of the cavitation erosion absence on the stepped surface. The probability of the cavitation erosion appearing is analyzed on stepped spillways of the Boguchany hydraulic works in Russia and Danj Tsyankow in PRC. There are obtained hydraulic friction ratios of the stepped surface under large inclinations of the spillway face. The calculations results showed that air availability in turbulent border layers decreases shear stresses between current layers and leads to reducing resistance and coefficient of hydraulic friction. It is shown that taking into consideration threshold speeds of the flow widens the area of usage of spillways with a stepped weir surface.

Aeration, stepped spillway, cavitation, hydraulic friction ratio.

Анализ построенных водосбросов со ступенчатой водосливной поверхностью показал, что чаще встречаются водосбросы с удельным расходом $q \leq 60 \text{ м}^3/\text{с}$ на пог. м. с отсутствием проявлений кавитационной эрозии на ступенях. Однако имеются данные о наличии кавитационной эрозии ступеней, в частности, на водосбросе гидроузла

Дань Цзянкоу в КНР, где на низовой грани бетонной плотины высотой $H_{\text{пл}} = 97 \text{ м}$ расположены ступени высотой $h_{\text{ст}} = 0,9 \text{ м}$. В 1973 г. после пропуска паводка с расходом $Q = 20\,400 \text{ м}^3/\text{с}$ при удельном расходе $q = 120 \text{ м}^3/\text{с}$ на пог. м. зафиксированы очаги кавитационной эрозии глубиной 1,2 м на ступенчатой поверхности водосброса (табл. 1).

Данные по эксплуатации водосбросов со ступенчатой поверхностью в КНР

Название гидроузла	$H_{пл}$, м	Q , м ³ /с	q , м ³ /с на пог. м	$h_{ст}$, м	Результат	Примечание
Шуй донь	63	5200	100	0,9	Без размыва в нижнем бьефе и без кавитации	В 1994 г. паводок перед завершением строительства
Бай сэ	120	5300	60	0,9		В 2007 г. паводок
		3000	34			В 2008 г. паводок
Дань Цзянкоу	97	20400	120	0,9	На поверхности ступени есть кавитационные каверны глубиной 1,2 м	В 1973 г. паводок

Для выявления режима рациональной работы водосбросов со ступенчатой водосливной поверхностью, который определяется отсутствием кавитационной эрозии ступеней, были проанализированы водосбросы с уклонами поверхности $i = 0,65, 0,75, 0,8, 1, 1,25$ и $1,5$. Эти уклоны соответствуют быстротокам с $i \leq 1 \dots 1,25$ и гравитационным плотинам с $i \geq 1,25$. Условия расчетов: высота ступеней $h_{ст} = 0,6, 0,8, 0,9, 1,0, 1,2$ м, удельный расход водосброса $q = 25, 50, 75, 100, 125 \text{ м}^3/\text{с на пог. м}$. Также были учтены следующие положения:

уклон водосливной поверхности определялся конструкцией водосброса (уклоном дна быстроточа или заложением низовой грани бетонной плотины из условий прочности и устойчивости);

высота ступени назначалась кратной толщине слоя укатанного бетона (если плотина из этого материала) по технологии укладки, длина ступени $l_{ст}$ определялась из соотношения $h_{ст}/\text{tg}\alpha$, где α – угол наклона водосливной поверхности.

в расчете принято допущение, что в конце водосброса со ступенчатой поверхностью формируется равномерное течение аэрированного потока для быстроточечного режима с глубиной потока h_0 [1, 2];

гидравлический расчет выполнялся для определенных величин удельного расхода, по которым установлен допустимый удельный расход из условия отсутствия кавитации и рациональных конструктивных размеров водосброса.

Главной особенностью, которую следует учитывать в гидравлическом расчете, работы водосбросов со ступенчатой водосливной поверхностью является формирование самоаэрируемого потока. В данных условиях характерная глубина аэрированного потока $(Y_{90})_0$ зависит от удельного расхода воды q_a с учетом уменьшения потерь по длине в аэрированном потоке.

В этих условиях изменения коэффициентов гидравлического трения λ ступенчатых поверхностей при уклонах поверхности $i > 0,3$ зависят не от относительной шероховатости ступенчатой поверхности $K_s/4R$ (здесь R – гидравлический радиус) при $K_s = h_{ст} \cos\alpha$, а от густоты их размещения, то есть от уклона дна, который формируется ступенями водосброса [1]. Также важно отметить, что в аэрированных потоках со свободной поверхностью осредненная по глубине потока концентрация воздуха зависит только от уклона поверхности и определяется зависимостями из [2]:

$$\bar{C}_0 = 0,9 \sin\alpha \quad (\text{при } \alpha \leq 40^\circ), \quad (1)$$

$$\bar{C}_0 = 0,9 \sin\alpha(1 - 0,1 \sin\alpha) \quad (\text{при } \alpha > 40^\circ), \quad (2)$$

где $\bar{C}_0$ – осредненная по глубине потока концентрация воздуха.

Глубина аэрированного потока $(Y_{90})_0$ представляет собой расстояние по нормали от дна до точки с местной концентрацией воздуха $C = 90 \%$ и зависит от удельного расхода воды водосброса и удельного расхода воды q_a с учетом уменьшения потерь по длине в аэрированном потоке.

Расчетная зависимость для $(Y_{90})_0$ имеет следующий вид:

$$(Y_{90})_0 = \frac{h_0}{1 - \bar{C}_0}, \quad (3)$$

где $h_0 = \sqrt[3]{q^2 \cdot \lambda_a / (8 \cdot g \cdot \sin\alpha)}$ – нормальная глубина потока с учетом самоаэрации; λ_a – коэффициент гидравлического трения для аэрированного потока; g – ускорение свободного падения.

Удельный расход воды q_a с учетом уменьшения потерь по длине в аэрированном потоке определялся так:

$$q_a = q \sqrt{\frac{\lambda}{\lambda_a}}, \quad (4)$$

$$\text{где } \frac{\lambda}{\lambda_a} = \frac{1}{(1 - 3,2\sqrt{\lambda \cdot \lg(1 - \bar{C}_0)})^2} \quad (5)$$

Коэффициент гидравлического трения без учета аэрации потока

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = \frac{24}{\sqrt{8g}} \lg \left(\frac{2R}{K_s} \right). \quad (6)$$

В соответствии с поставленной задачей для изучаемых водосбросов с указанными параметрами выполнены гидравлические расчеты по зависимостям (1)–(6), на основании которых возможно проанализировать условия работы любого ступенчатого водосброса. В частности получено, что для гидроузла Дань Цзянкоу область допустимых удельных расходов при условии отсутствия кавитационной

эрозии и без учета пороговых скоростей потока не превышает 55 м³/с на пог. м. Так как фактический удельный расход водосброса составил 120 м³/с на пог. м., ступени оказались подвержены кавитационной эрозии. Учет пороговых скоростей потока крайне важен для реальной оценки кавитационно-эрозионных условий ($V_{\text{пор}} = V_{\text{хар}}$). Это условие выполнено для расчетов водосливных ступенчатых граней с уклонами $i = 1$ и 1,25. В результате получено, что наблюдается увеличение величин допустимых удельных расходов до 30 % при $V_{\text{пор}} = 20$ м/с (таблица 2) и в 2 раза при $V_{\text{пор}} = 24$ м/с (при $i = 1,25$).

Таблица 2

Допустимые удельные расходы водосбросов со ступенчатой водосливной поверхностью при $i = 1$ (1,25)

Высота ступени $h_{\text{ст}}$, м	Допустимый q при $K = K_{\text{кр.эр}}$, м³/с на пог. м	Допустимый q при $V_{\text{хар}} = V_{\text{пор}} = 20$ м/с, м³/с на пог. м
0,6	42 (48)	60 (60)
0,8	37 (44)	54 (54)
0,9	34 (41)	48 (48)
1,0	30 (38)	45 (50)
1,2	27 (35)	40 (44)

Примечание: $K_{\text{кр.эр}}$ – критический параметр кавитационной эрозии; K – расчетный параметр кавитации

Для условий работы гидроузла Дань Цзянкоу определена характерная скорость потока на высоте верха ступени по зависимости:

$$V_{\text{хар}} = 5,6 \cdot \bar{V}_a \cdot \sqrt{\frac{\lambda_a}{8}} = 25,14 \text{ м/с.} \quad (7)$$

Получены расчетный параметр кавитации $K = 0,56$ и показатель стадии кавитации β с учетом критического параметра по кавитационной эрозии $K_{\text{кр.эр}} = 0,8 K_{\text{кр}}$ при $K_{\text{кр}} = 1$: в результате $\beta = K/K_{\text{кр.эр}} = 0,66$ [4].

После зафиксированных разрушений ступеней водосброс Дань Цзянкоу

был реконструирован в «гладкий» с носком-трамплином в конце водосбросной грани плотины.

Аналогичный анализ вероятности появления кавитационной эрозии на ступенчатом водосбросе с высотой ступени $h_{\text{ст}} = 1,5$ м и $q = 40$ м³/с на 1 пог. м выполнен для Богучанского гидроузла в России. В результате получено, что при расчетном параметре $K = 1,15$ кавитация на ступенях отсутствует.

В таблице 3 приведены результаты расчетов параметров потока на ступенчатых поверхностях водосбросов Дань Цзянкоу (КНР) и Богучанского (Россия) гидроузлов.

Таблица 3

Параметры потока на ступенчатой поверхности водосбросов

Гидроузел	i	K_s	$\bar{C}$	h , м	λ	λ_a	q_a , м³/с	h_o , м	$(Y_{90})_0$, м	$V_{\text{хар}}$, м/с	V_a , м/с
Дань Цзянкоу	1,0	0,68	0,63	1,5	0,3	0,1	207,8	2,94	7,94	25,14	40,86
Богучанский	0,85	0,58	0,68	0,1	0,64	0,12	90,55	1,7	5,32	16,4	23,5

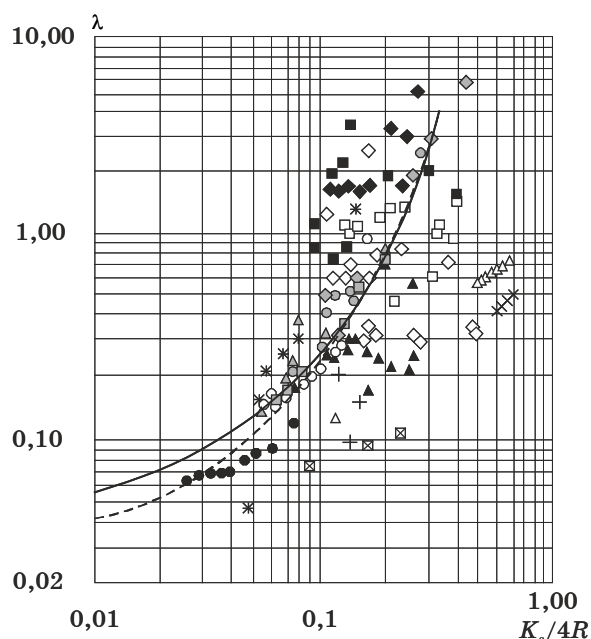
Примечание: h – нормальная глубина потока в пределах водосбросной части при расчетном удельном расходе водосброса q .

Результаты, представленные в таблице 3, подтверждают, что наличие воздуха в турбулентных пограничных

слоях уменьшает сдвиговые напряжения между слоями потока, следовательно и силу трения, приводит к уменьшению

сопротивления и коэффициентов гидравлического трения [1–3].

На рисунке представлены коэффициенты гидравлического трения не в аэрированном потоке, дополненные авторами статьи для больших уклонов водосливной ступенчатой поверхности в зависимости от относительной шероховатости ступенчатой поверхности $K_s/4R$ при $K_s = h_{ст.} \cos \alpha$.



Коэффициенты гидравлического трения ступенчатых поверхностей при угле α :
 $\blacktriangle$ – 55° по Christodoulou (1993); $\square$ – 53° по Diez-Cascon, Blanco, Ravilla и Garcia (1991); $\blacksquare$ – 52° по Sorensen (1985); $\blacklozenge$ – 51° ; $\diamond$ – 51° по Bindo, Gautier и Lacroix (1993); $\triangle$ – 45° и $\times$ – 27° по Peyras, Royet и Degoutte (1992); $+$ – 27° по Frizell (1992); $\boxtimes$ – 17° по И. С. Новиковой, Н. Н. Розановой; $*$ – $8,7^\circ$ по Ю. П. Правдивец (натура); $\bullet$ – 11° и $\circ$ – $5,7^\circ$ по Norri (1984); $\ominus$ – $56,3^\circ$, Δ – 51° , $\blacksquare$ – 45° , $\blacklozenge$ – 38° по данным авторов статьи; 1 – кривая по уравнению (1) из [1]; 2 – кривая по уравнению (1) из [1]

Из данных, показанных на рисунке, видно, что разброс экспериментальных точек большой, который подробно проанализирован в [1]. Полученные новые данные для коэффициента гидравличе-

ского трения поверхностей с большими уклонами сгруппированы в зоне кривой, которая близка к формуле А. П. Зегжда (6) для открытых потоков [1].

Выводы

Главной особенностью работы водосбросов со ступенчатой водосливной поверхностью является самоаэрация потока, которая оказывает принципиальное воздействие на гидравлические характеристики потока.

Коэффициенты гидравлического трения ступенчатых поверхностей при больших уклонах и в зависимости от относительной шероховатости, полученные по рекомендуемой методике расчета, дополняют и хорошо согласуются с имеющимися исследованиями других авторов [1–3].

Область допустимых удельных расходов водосбросов со ступенчатой водосливной поверхностью высоких бетонных плотин обычно не превышает $60 \text{ м}^3/\text{с}$ на пог. м при условии отсутствия кавитационной эрозии ступеней, а учет пороговых скоростей потока расширяет область применения рассматриваемых водосбросов.

1. Новикова И. С., Розанова Н. Н. Рациональная область применения ступенчатых водосбросов и особенность гидравлического расчета: Актуальные проблемы гидротехники: сб. трудов. – М.: ФГБОУ ВПО МГУП, 2013. – С. 127–137.

2. Chanson H. Hydraulics design of stepped cascades, channels, weirs and spillways. – Oxford: Pergamon, 1995. – 292 p.

3. Chanson H. The hydraulics of stepped chutes and spillways. – Lisse: Balkema, 2001. – 418 p.

4. Гидравлические расчеты водосбросных гидротехнических сооружений: справочное пособие / Д. Д. Лаппо [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 624 с.

Материал поступил в редакцию 02.06.14.

Розанова Нина Николаевна, кандидат технических наук, профессор кафедры гидротехнических сооружений
 Тел. 8 (499) 976-24-60

Чэнь Янь Фэй, магистр техники и технологии