

Н. В. Синицын

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТОКА НА ВОДОСЛИВЕ С ШИРОКИМ ПОРОГОМ

При проектировании гидротехнических сооружений часто приходится производить гидравлические расчеты водосбросных сооружений, работающих по схеме водослива с широким порогом (водосбросных отверстий плотин, совмещенных ГЭС, регулирующих, перегораживающих и водомерных сооружений на открытой регулирующей сети, мостов и безнапорных труб под насыпями дорог). В решении ряда задач по теории водослива с широким порогом (определение его пропускной способности, построение кривых свободной поверхности и т. д.) часто используются методы гидравлики установившегося неравномерного движения. Этим самым предполагается пренебрежимо малая степень искривления и расходимости струек, наличие на отдельных участках порога потока с медленно изменяющимся движением и гидростатическим законом распределения давлений по живому сечению.

Однако в настоящее время существует мнение [1, 2, 3, 4, 5], что явления, происходящие на водосливе с широким порогом, связаны со значительной деформацией потока в вертикальной плоскости. Следовательно, попытки раскрыть основные закономерности истечения через водослив не могут быть успешными до тех пор, пока не будут изучены основные свойства и характеристики такого деформированного потока.

В гидротехнической лаборатории Белорусского политехнического института была выполнена и установлена в зеркальном лотке модель водослива с широким порогом из органического стекла (рис. 1). Ее размеры: длина порога $c=40,0$ см, ширина $b=10,0$ см, высота порога p в первой серии опытов равнялась 20,0 см, во второй — 10,0 см. Напор на водосливе H изменялся приблизительно от 1,5 до 20,0 см через 1,5 см, что позволило иметь соотношение $\frac{c}{H} \approx 2,0-25,0$. Исследовался поток, который имел место при переливе воды через порог с острой входной кромкой, отсутствии бокового сжатия на входе и подтопления со стороны нижнего бьефа.

Было проведено около 30 опытов. В каждом опыте измерению подле-

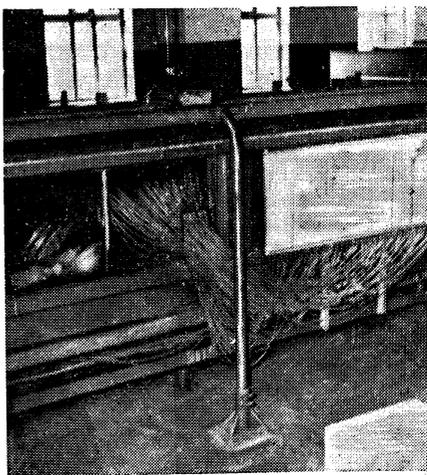


Рис. 1. Общий вид модельной установки.

жали: расход Q (л/сек), отметки свободной поверхности ∇ (см) и давления $\frac{P}{\gamma}$ (см) по глубине потока в ряде створов на пороге. Пропускная способность водослива определялась с помощью треугольного мерного водослива, установленного в оголовке лотка. Для определения отметок свободной поверхности (глубин на пороге) использовалась подвижная мерная игла. Давления в потоке измерялись с помощью пьезометров, установленных в полубычке и пороге заподлицо с их лицевыми гранями.

Продольные профили потока, построенные на основании данных эксперимента, позволили выделить три основные схемы свободной поверхности потока на пороге водослива (рис. 2). Водослив с участком

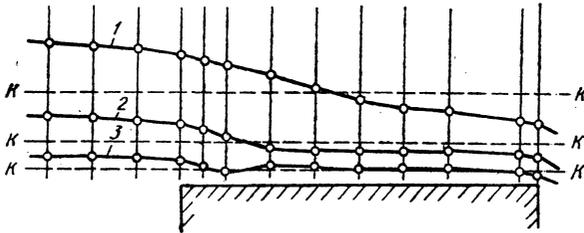


Рис. 2. Характерные профили потока на пороге водослива:

$$1 - \frac{c}{H} = 2,5; \quad 2 - \frac{c}{H} = 5,5; \quad 3 - \frac{c}{H} = 13,5; \quad K-K - \text{линии критических глубин.}$$

приблизительно горизонтальной свободной поверхности (кривая 2) имеет место лишь при $4,5 \leq \frac{c}{H} \leq 10,0$. Этот участок сопрягается с верхним бьефом посредством криволинейного участка с выпуклой поверхностью в начале и вогнутой — в конце. Такую форму истечения через водослив и имеют в виду, когда говорят о наличии на пороге параллельноструйного движения. Глубины приблизительно параллельноструйного потока меньше критической. При $\frac{c}{H} \leq 4,5 - 5,0$ имеет место схема течения с непрерывным понижением глубин вдоль потока (кривая 1). Следовательно, здесь на всем протяжении порога поток деформируется; при этом в начале поверхность потока выпуклая, затем на средней части вогнутая и на споре с порога опять выпуклая. В соответствии с этим имеется две точки перегиба кривой свободной поверхности, причем в первой глубина больше, а во второй — меньше критической. Переход через критическую глубину происходит на участке искривления свободной поверхности выпуклостью вниз. При значительной длине порога ($\frac{c}{H} > 10,0 - 12,5$) устанавливается течение, близкое к волнообразному (кривая 3). Глубины здесь на всем протяжении порога больше критической. При весьма значительной длине порога ($\frac{c}{H} > 20,0$) поток принимает форму кривой спада в канале с горизонтальным дном.

Анализ эпюр давлений, построенных по показаниям пьезометров, свидетельствует о наличии в деформированном водосливном потоке значительных сил инерции, обусловленных кривизной линий токов и приводящих к нарушению гидростатического распределения давлений (рис. 3). На начальном участке порога, где поток имеет явно выпуклую

свободную поверхность, наблюдается дефицит (недостаток) давлений до гидростатических. На участке вогнутой свободной поверхности наблюдается избыток давлений над гидростатическими. В сечении, где свободная поверхность потока переходит от вогнутой к выпуклой ($\frac{c}{H} < 4,5$), а также на участке приблизительно параллельноструйного течения ($4,5 \leq \frac{c}{H} \leq 10,0$), давления близки к гидростатическим. На сходе с водослива, где имеет место значительное понижение глубин и образование участка с резким изменением кривизны выпуклой свободной по-

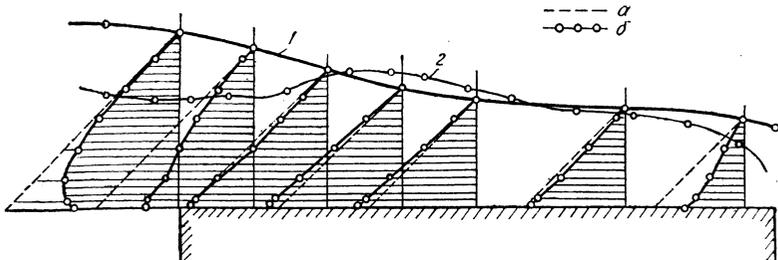


Рис. 3. Характер изменения давлений в потоке на пороге водослива ($\frac{c}{H} = 3,0$):

1 — линия свободной поверхности; 2 — линия донных давлений; а — эпюра давлений при их распределении по гидростатическому закону; б — эпюра давлений по опытным данным.

верхности, давления значительно меньше гидростатических. Следует отметить, что в сечениях, где не соблюдается гидростатический закон распределения давлений, характер «негидростатичности» по высоте потока различен и обусловлен неодинаковостью искривления струек по глубине. Поэтому о результирующей величине удельной потенциальной энергии сечения нельзя судить по показаниям отдельных пьезометров, например, только донных, поскольку они фиксируют лишь местные, «локальные» давления. Необходимо рассматривать всю эпюру распределения давлений в сечении.

С учетом этих обстоятельств следует с осторожностью относиться к тем зависимостям и выводам, которые получены для водослива с широким порогом без учета деформации потока без учета компонентов ускорения в плоскости поперечного сечения.

Так, для водослива с широким порогом из уравнения энергии и уравнения расхода получено известное выражение

$$q = \varphi h \sqrt{2g(H_0 - h^*)}, \quad (1)$$

где q — удельный расход; h — глубина параллельноструйного участка на пороге; h^* — удельная потенциальная энергия в сечении на пороге; H_0 — полный напор перед водосливом; φ — коэффициент скорости.

Уравнение (1) не дает однозначного решения, так как при данном H_0 значения q могут быть различными в зависимости от глубины h , удельной энергии h^* .

Следовательно, для данного уравнения необходимо еще дополнительное условие. С этой целью исследователями были предложены постулаты о максимуме расхода, о минимуме удельной энергии в сечении на пороге водослива и др. Накопленный экспериментальный мате-

риал, однако, не подтвердил их справедливость. Действительная глубина на пороге получается меньше критической.

Универсальной, общепризнанной зависимости, которая определяла бы значение глубины h , а равно и h^* , получить не удалось. Поэтому в настоящей работе делается попытка найти связь между относительной глубиной $\frac{h}{H_0}$ и степенью стеснения потока $\frac{H}{H+p}$ для условий опыта. Наличие картины распределения давлений (в отдельных сечениях) по всей длине порога позволило совершенно четко определить сечение (участок), где имеет место гидростатический закон распределения давлений. Они находятся за участком с вогнутой свободной поверхностью, т. е. при переходе от этого участка ко второму участку с выпуклой поверхностью. Это обстоятельство дало возможность принять глубину h в таком сечении за меру удельной потенциальной энергии h^* и считать ее расчетной характеристикой сечения.

В общем же случае отождествлять эти два понятия нельзя, так как они в искривленном потоке неравнозначны. Если, например, вместо уравнения (1) для определения расхода использовать обычную формулу вида

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

то в случае отсутствия на пороге сечения с гидростатическим распределением давлений, что не исключено при малых $\frac{c}{H}$ и $\frac{p}{H}$ (поток по всей длине порога имеет выпуклую свободную поверхность), значение коэффициента расхода

$$m = \varphi \frac{h}{H_0} \sqrt{1 - \frac{h^*}{H_0}} \quad (3)$$

может оказаться заниженным, так как результирующее давление h^* здесь меньше глубины h .

После определения, таким образом, для каждого из 26 опытов расчетной (а не сжатой) глубины, анализу была подвергнута связь между относительными величинами $\frac{h}{H_0}$ и $\frac{H}{H+p}$. Обработка экспериментальных данных показала (рис. 4), что эта зависимость $\frac{h}{H_0} = f\left(\frac{H}{H+p}\right)$ может быть описана следующим выражением (уравнением параболы со смещенным фокусом):

$$\frac{h}{H_0} = 0,506 + 0,61 \left(\frac{H}{H+p} - 0,325 \right)^2. \quad (4)$$

Наличие эпюр распределения давлений в сечениях по длине потока дало возможность более точно оценить и значение коэффициента скорости φ , характеризующего потери как на входе, так и на самом пороге.

Формула для определения φ имела вид

$$\varphi = \frac{q}{0,443 h \sqrt{H_0 - h}}, \quad (5)$$

где q — расход водослива, л/сек; h — глубина потока в расчетном сечении и одновременно мера потенциальной удельной энергии, см; H_0 —

полный напор перед водосливом, см; $0,443 = 0,01 \sqrt{2g}$, где g выражено в см/сек².

Полученные данные подтверждают, что коэффициент скорости существенно зависит от степени стеснения потока (параметра $\frac{H}{H+p}$). При

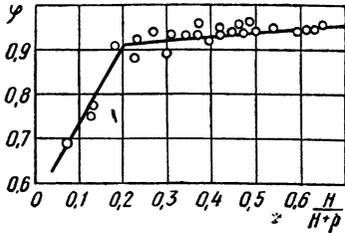


Рис. 4. Зависимость $\frac{h}{H_0} = f\left(\frac{H}{H+p}\right)$.

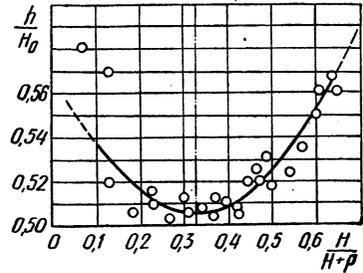


Рис. 5. Зависимость $\varphi = f\left(\frac{H}{H+p}\right)$.

этом, в зоне $\frac{H}{H+p}$ свыше 0,2 при наличии нескругленной входной кромки между φ и $\frac{H}{H+p}$ имеет место прямолинейная связь (рис. 5):

$$\varphi = 0,91 + 0,80 \left(\frac{H}{H+p} - 0,20 \right). \quad (6)$$

В зоне сильного стеснения потока ($\frac{H}{H+p} \leq 0,2$) значение коэффициента φ можно определить по формуле

$$\varphi = 0,65 + 1,75 \left(\frac{H}{H+p} - 0,05 \right). \quad (7)$$

Экспериментальные зависимости для h и φ позволяют по формуле (3) определить для данной конструкции водослива с широким порогом (в диапазоне $\frac{H}{H+p}$ от 0,1 до 0,9) значения коэффициентов расхода (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

$\frac{H}{H+p}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$\frac{h}{H_0}$	0,537	0,515	0,506	0,509	0,524	0,552	0,592	0,643	0,709
$1 - \frac{h}{H_0}$	0,463	0,485	0,494	0,491	0,476	0,448	0,408	0,357	0,291
$\sqrt{1 - \frac{h}{H_0}}$	0,690	0,695	0,701	0,700	0,688	0,668	0,638	0,597	0,540
φ	0,740	0,910	0,918	0,926	0,934	0,942	0,950	0,958	0,966
$m_{расч}$	0,270	0,325	0,326	0,330	0,337	0,348	0,359	0,368	0,370
$m_{ту 12-51}$	0,320	0,327	0,332	0,337	0,342	0,360	0,364	0,375	0,378

Как показывает сравнение значений m , вычисленных и рекомендуемых техническими условиями [6], расчетные коэффициенты расхода получились несколько ниже. Особенно большая разница при высоком пороге и большом соотношении $\frac{c}{H}$ (свыше 20). В целом же расхождение значений m не превышает 3%.

Литература

1. В. В. Смыслов. Теория водосливов с широким порогом. Киев, 1956.
2. В. В. Смыслов. К решению задачи о незатопленном водосливе с широким порогом. Сб. «Гидравлика и гидротехника». Вып. 7. Киев, 1968.
3. В. А. Шаумян. Научные основы орошения и оросительных сооружений. М., 1948.
4. В. Т. Чоу. Гидравлика открытых каналов. М., 1969.
5. А. Р. Березинский. Пропускная способность водослива с широким порогом. М.—Л., 1950.
6. Технические условия и нормы проектирования гидротехнических сооружений. Гидравлические расчеты водосливов (ТУ-12-51). М.—Л., 1952.