

УДК 532.532.+532.59

## КОЭФФИЦИЕНТЫ РАСХОДА И ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ ПРИ ИСТЕЧЕНИИ ЧЕРЕЗ ПРОРАН В ПЛОТИНЕ ТРАПЕЦЕИДАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ

В. И. Букреев, В. В. Дегтярев\*, А. В. Чеботников\*

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск

\* Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет,  
630008 Новосибирск

E-mail: bukreev@hydro.nsc.ru

Приведены экспериментальные данные о коэффициентах расхода и потерь энергии для двух водосливов полигонального профиля с боковым поджатием, необходимые, в частности, при расчетах волн, возникающих после частичного разрушения плотины. Показано, что значения этих коэффициентов для водослива с трапецеидальным профилем и заложением откосов 1 : 3 несущественно отличаются от их значений для водослива с прямоугольным профилем.

Ключевые слова: волны при разрушении плотины, проран, коэффициенты расхода и потерь энергии.

При частичном разрушении плотины образуется отверстие (проран), площадь поперечного сечения которого меньше площади поперечного сечения русла в створе плотины. В работе [1] предложен метод решения соответствующей модельной задачи на основе первого приближения теории мелкой воды, в котором в отличие от метода решения классической задачи о полном разрушении [1, 2] расход задается из эксперимента. Вследствие трехмерного характера течения в окрестности прорана при расчетах волн после частичного разрушения плотины до сих пор сохраняется необходимость дополнительного использования эмпирической информации. В теории [1] предполагается, что после разрушения плотины течение в окрестности прорана быстро выходит на стационарный режим. Эксперименты [3, 4] подтверждают это предположение. Поэтому при расчетах по методу, предложенному в [1], достаточно знать коэффициент расхода при стационарном истечении через водослив в форме прорана. Форма и размеры прорана существенно влияют на расход.

Имеющиеся экспериментальные данные о коэффициентах расхода водосливов различной формы приведены в справочниках по гидравлике [5]. Цель данной работы — дополнить эту информацию. Поскольку экспериментальные данные о характеристиках течения через водослив необходимы не только при расчетах волн после частичного разрушения плотины по методу, предложенному в [1], в опытах наряду с коэффициентом расхода измерялся коэффициент потерь энергии.

Реальным условиям частичного разрушения плотины соответствует водослив с полигональным профилем и с боковым поджатием [5]. Схема такого водослива представлена на рис. 1. В данной работе приведены результаты опытов с водосливами с прямоугольным

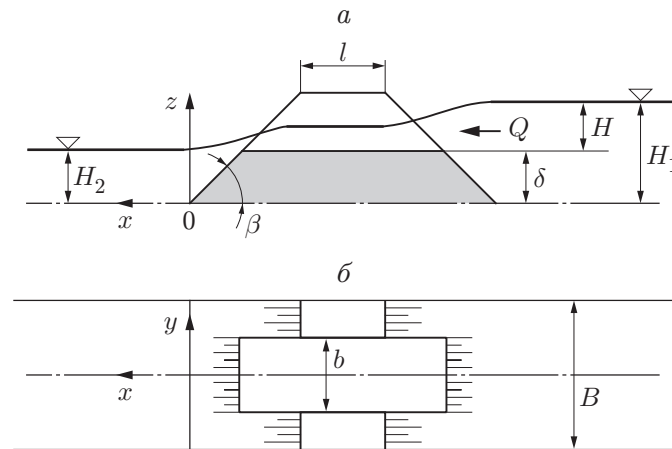


Рис. 1. Схема течения:

*a* — продольный разрез; *b* — вид сверху

профилем (угол наклона верхней и нижней граней  $\beta = \pi/2$ ) и с трапецеидальным профилем ( $\text{tg } \beta = 1/3$ ) (см. рис. 1). Рассматриваются только коэффициенты расхода и потерь энергии. Некоторая информация об уровне свободной поверхности, устанавливаемомся перед прямоугольным прораном после частичного разрушения плотины, приведена в [3, 4]. Экспериментальные данные о коэффициенте расхода водослива с прямоугольным профилем содержатся в [5]. Эти данные использованы в настоящей работе для проверки методики исследований и дополнены данными о коэффициенте потерь энергии. В случае водослива с трапецеидальным профилем представляет интерес вся полученная информация.

Опыты выполнялись в прямоугольном канале шириной  $B = 20$  см, высотой 25 см и длиной 7 м с ровным горизонтальным дном. Несмотря на относительно малые размеры поперечного сечения канала, в нем можно получать такие значения числа Рейнольдса, при которых характеристики течения не зависят от этого параметра. Более детально влияние числа Рейнольдса обсуждается ниже.

Ширина прорана  $b = 6$  см ( $b/B = 0,3$ ), высота гребня водослива  $\delta = 7,2$  см и параметр  $l = 38$  см (см. рис. 1) во всех опытах были одними и теми же. Помимо угла наклона граней  $\beta$  в опытах варьировался расход  $Q$  и тем самым напор над гребнем водослива  $H$ , а также начальная глубина нижнего бьефа  $H_{20}$ . Расход измерялся с помощью стандартного расходомера Вентури, предварительно прокалиброванного объемным способом. Уровни свободной поверхности определялись по показаниям пьезометров, расположенных в точках, где распределение давления по глубине было заведомо гидростатическим. В ряде контрольных опытов показания пьезометров проверялись мерными иглами.

Коэффициент расхода  $m$  определяется по формуле [5]

$$m = Q / (bH \sqrt{2gH}),$$

где  $g$  — ускорение свободного падения. В тех поперечных сечениях стационарного потока со свободной поверхностью, где давление распределено по гидростатическому закону, удельная энергия сечения  $e$ , имеющая размерность длины, определяется по формуле [5]

$$e = h + \alpha_e u^2 / (2g).$$

Здесь  $h$  — глубина потока;  $\alpha_e$  — корректив кинетической энергии [5];  $u = Q/S$  — осредненная скорость жидкости;  $S$  — площадь рассматриваемого поперечного сечения потока. По определению [5] глубина потока воды есть расстояние от свободной поверхности до дна

канала. В дальнейшем величины  $e$ ,  $h$ ,  $\beta$ ,  $u$  с нижним индексом 1 соответствуют верхнему бьефу, с индексом 2 — нижнему бьефу. Коэффициент потерь энергии  $\zeta$  определяется формулой [5]

$$\zeta = (e_1 - e_2)/e_1. \quad (1)$$

При расчетах по этой формуле примем значение  $\alpha_e = 1$ . Это накладывает дополнительные условия на выбор поперечных сечений, в которых определяются величины  $e_1$  и  $e_2$ . В этих сечениях не только распределение давления по вертикали должно быть гидростатическим, но и значения  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  должны мало отличаться от единицы, что характерно для развитого турбулентного течения в канале. При этом небольшое отличие от принятого в расчетах значения  $\alpha_e = 1$  учитывается эмпирическим коэффициентом  $\zeta$ . В данных опытах пьезометры располагались там, где при их перемещении вдоль оси  $x$  на расстояние  $\pm 10H$  изменение значений  $m$  и  $\zeta$  не превышало погрешности измерений. Об этой погрешности можно судить по разбросу экспериментальных точек на рис. 2–5.

С учетом реальных условий при разрушении плотины опыты выполнялись следующим образом. Задавалось несколько значений начальной глубины нижнего бьефа  $H_{20}$ , и при каждом из них варьировалось стационарное значение расхода в диапазоне от 0,25 до 4 л/с. Измерения выполнялись, когда величины  $H_1$  и  $H_2$  выходили на постоянные значения. При этом значение  $H_2$  могло отличаться от  $H_{20}$  (в данных опытах  $H_2 < H_{20}$ ).

Как известно, в определенном диапазоне параметров задачи в некотором поперечном сечении над рассматриваемыми водосливами устанавливается критическая глубина [3–5], которая вычисляется по формуле

$$h_* = (q^2/g)^{1/3}, \quad q = Q/B.$$

Если  $H_2 < h_* + \delta$ , то режим сопряжения бьефов заведомо неподтопленный. Влияние подтопления характеризуется безразмерным параметром

$$P^0 = (H_2 - \delta)/h_*.$$

Физический смысл имеют только положительные значения  $P^0$ .

В соответствии с принятым в гидравлике способом представления рассматриваемых функций [5] на рис. 2, 4, 5 в качестве аргумента используется размерная величина напора над гребнем водослива  $H$ , поэтому представленные на них зависимости непосредственно можно использовать только для воды. Чтобы использовать их для любой несжимаемой капельной ньютоновской жидкости, необходимо перейти к аргументу  $H^0 = Hg^{1/3}/\nu^{2/3}$ , где  $\nu$  — кинематический коэффициент вязкости рассматриваемой жидкости. Такое преобразование приводит только к изменению масштаба по оси абсцисс. Для того чтобы выполнить преобразование, следует умножить значения  $H$  на величину  $g^{1/3}/\nu_w^{2/3}$ , где  $\nu_w$  — кинематический коэффициент вязкости воды при температуре 16 °С, соответствующей условиям данных опытов.

На рис. 2 приведены зависимости  $m$  от  $H$  при различных значениях  $H_{20}$  для водосливов с прямоугольным и трапецеидальным профилями. В случае водослива с прямоугольным профилем и в неподтопленном режиме коэффициент  $m \approx 0,314$  при всех значениях  $H_{20}$  и  $H$ , превышающих некоторое значение  $H_*$ , что хорошо согласуется с данными, приведенными в [5]. В неподтопленном режиме при  $H < H_*$  проявляется влияние числа Рейнольдса и коэффициент  $m$  уменьшается. Из рис. 2,а следует, что при  $H_{20}/\delta = 1$ , когда режим сопряжения является неподтопленным при всех значениях  $H$ , значение  $H_* = 4 \div 5$  см. Отклонение значения коэффициента расхода от его асимптотического значения при других значениях  $H_{20}^0 = H_{20}/\delta$  на рис. 2,а обусловлено влиянием подтопления.

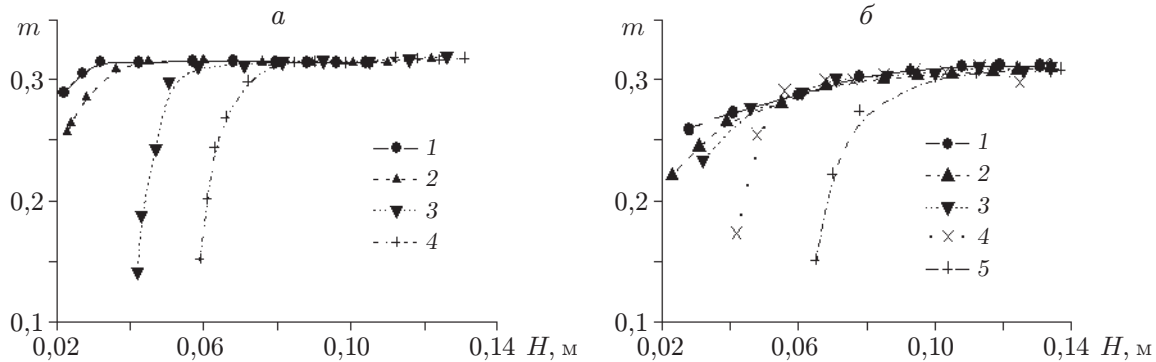


Рис. 2. Зависимость коэффициента расхода от напора:  
*a* — водослив с прямоугольным профилем (1 —  $H_{20} = 7,2$  см; 2 —  $H_{20} = 9,4$  см; 3 —  $H_{20} = 11,35$  см; 4 —  $H_{20} = 12,9$  см); *б* — водослив с трапецидальным профилем (1 —  $H_{20} = 7,2$  см; 2 —  $H_{20} = 8,3$  см; 3 —  $H_{20} = 9,4$  см; 4 —  $H_{20} = 11,2$  см; 5 —  $H_{20} = 13,4$  см)

В неподтопленном режиме целесообразно определить “пороговое” значение числа Рейнольдса  $Re_*$ , при превышении которого влиянием вязкости можно пренебречь:

$$Re_* = V_* h_* / \nu = m H_* \sqrt{2gH_*} / \nu.$$

В данных опытах получено значение  $Re_* = 1,55 \cdot 10^4$  (при  $H = H_* = 5$  см). При  $Re_* > 1,55 \cdot 10^4$  отличие коэффициента расхода от его асимптотического значения  $m = 0,314$  не превышает 3 %.

Для водослива с трапецидальным профилем (рис. 2, *б*) наиболее существенная особенность коэффициента расхода заключается в том, что даже в области универсальности по параметрам  $H_{20}/\delta$ ,  $P^0$  и числу Рейнольдса имеется диапазон, в котором значение  $m$  зависит от напора над гребнем водослива  $H$ . Условия на наклонных боковых гранях такого водослива отличаются от условий на вертикальных гранях водослива с прямоугольным профилем. В частности, часть жидкости, вытекающей через наклонную грань, имеет вертикальную компоненту скорости и не вносит вклад в продольную компоненту количества движения.

На рис. 3 приведена зависимость коэффициента расхода от степени подтопления  $P^0$  для водослива с прямоугольным профилем. По физическим соображениям влияние это-

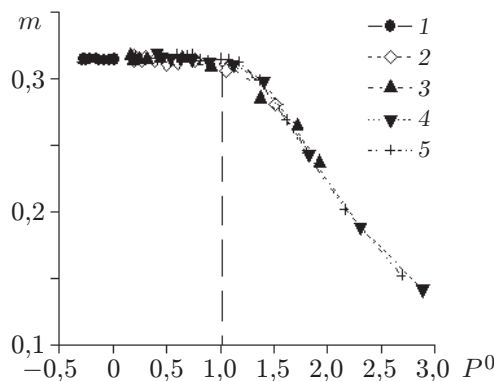


Рис. 3. Зависимость коэффициента расхода от степени подтопления для водослива с прямоугольным профилем:  
 1 —  $H_{20} = 7,2$  см; 2 —  $H_{20} = 8,95$  см; 3 —  $H_{20} = 9,4$  см; 4 —  $H_{20} = 11,35$  см; 5 —  $H_{20} = 12,9$  см

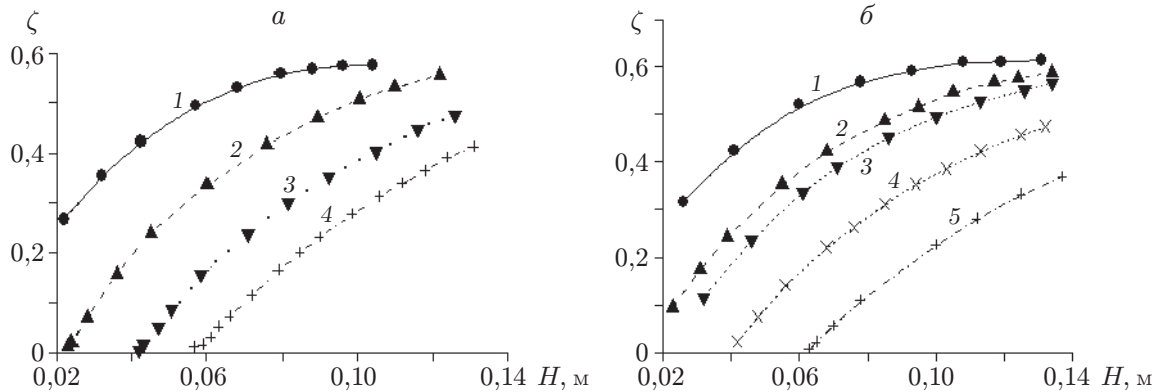


Рис. 4. Зависимость коэффициента потерь энергии от напора:

*a* — водослив с прямоугольным профилем (1 —  $H_{20} = 7,2$  см; 2 —  $H_{20} = 9,4$  см; 3 —  $H_{20} = 11,35$  см; 4 —  $H_{20} = 12,9$  см); *б* — водослив с трапецидальным профилем (1 —  $H_{20} = 7,2$  см; 2 —  $H_{20} = 8,3$  см; 3 —  $H_{20} = 9,4$  см; 4 —  $H_{20} = 11,2$  см; 5 —  $H_{20} = 13,4$  см)

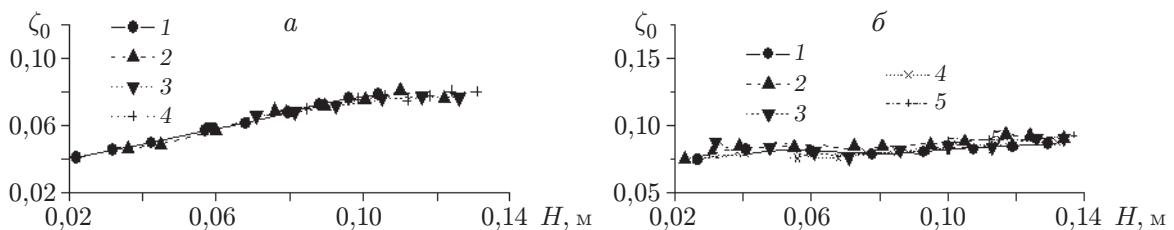


Рис. 5. Зависимость коэффициента потерь энергии на вход в проран от напора (обозначения те же, что на рис. 4)

го параметра может проявляться только при  $P^0 > 1$ , когда разность между глубиной нижнего бьефа и высотой гребня водослива превышает критическую глубину. В случае  $b/B = 1$  влияние подтопления начинает проявляться только в диапазоне  $P^0 > 1,2 \div 1,3$  [5]. Данные на рис. 3 подтверждают этот вывод и для рассмотренного в настоящей работе значения  $b/B$ .

На рис. 4 приведена зависимость коэффициента потерь энергии  $\zeta$ , определяемого формулой (1), от напора над гребнем водослива  $H$ . Рис. 4, *a* соответствует водосливу с прямоугольным профилем, рис. 4, *б* — водосливу с трапецидальным профилем. Из рис. 4 следует, что коэффициент потерь энергии существенно зависит от начальной глубины нижнего бьефа. Чем меньше эта глубина при прочих равных условиях, тем больше потери энергии. Эти потери весьма значительны. При  $H_{20} = 7,2$  см (неподтопленный режим) и  $H = 10$  см в нижнем бьефе на расстоянии от плотины  $x/H_2 = 100$  остается только 45 % энергии верхнего бьефа. С увеличением степени подтопления потери энергии уменьшаются.

На рис. 5 приведены экспериментальные данные о коэффициенте потерь энергии на вход  $\zeta_0$  в водосливы с прямоугольным и трапецидальным профилями. Коэффициент  $\zeta_0$  определялся по формулам

$$\zeta_0 = \frac{e_1 - e_0}{e_1}, \quad e_0 = h_* + \frac{V_*^2}{2g}, \quad V_* = \frac{Q}{bh_*}. \quad (2)$$

При подтопленном режиме формулы (2) неприменимы, поэтому экспериментальные точки на рис. 5 приведены только для неподтопленного режима. Сравнение с соответствующими данными на рис. 4 показывает, что потери энергии на вход составляют существенную часть общих потерь.

В целом опыты показали, что при расчетах волн после частичного разрушения плотины с трапецеидальным профилем и наклоном верхней и нижней граней 1 : 3 можно без большой погрешности использовать значения коэффициентов расхода и потерь энергии для водослива с прямоугольным профилем при одинаковых значениях параметров  $b$ ,  $\delta$  и  $l$ , особенно при больших напорах. Если для параметра  $l/H$  водослива с прямоугольным профилем выполнено условие  $2 < l/H < 12 \div 15$ , то можно использовать также имеющиеся в справочниках данные для водослива с широким порогом [5].

Следует учитывать, что при расчете расхода и энергии, поступающей в нижний бьеф после разрушения плотины, в качестве  $H$  нужно использовать не начальный напор над гребнем прорана  $h_0 - \delta$ , а меньшую величину  $H_p$ , определяемую переносом части энергии в верхний бьеф. В случае полного разрушения плотины и при неподтопленном режиме в нижний бьеф поступает только  $2/3$  начальной энергии верхнего бьефа над дном канала, а  $1/3$  переносится вверх по потоку волной понижения уровня [1, 2]. Предварительные опыты с удалением щита, создающего начальный перепад уровня свободной поверхности перед рассмотренным водосливом с прямоугольным профилем, показали, что в неподтопленном режиме отношение  $H_p/H = 0,9$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Христианович С. А.** Неустановившееся движение в каналах и реках // Некоторые новые вопросы механики сплошной среды. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1938. С. 15–154.
2. **Стокер Дж. Дж.** Волны на воде. Математическая теория и приложения. М.: Изд-во иностр. лит., 1959.
3. **Букреев В. И.** О глубине воды в проране при частичном разрушении плотины // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2005. № 5. С. 115–123.
4. **Букреев В. И.** О расходной характеристике в створе плотины после ее разрушения // ПМТФ. 2006. Т. 47, № 5. С. 77–87.
5. **Справочник** по гидравлическим расчетам / Под ред. П. Г. Киселева. М.: Энергия, 1972.

*Поступила в редакцию 22/IX 2006 г.,  
в окончательном варианте — 20/VIII 2007 г.*