

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

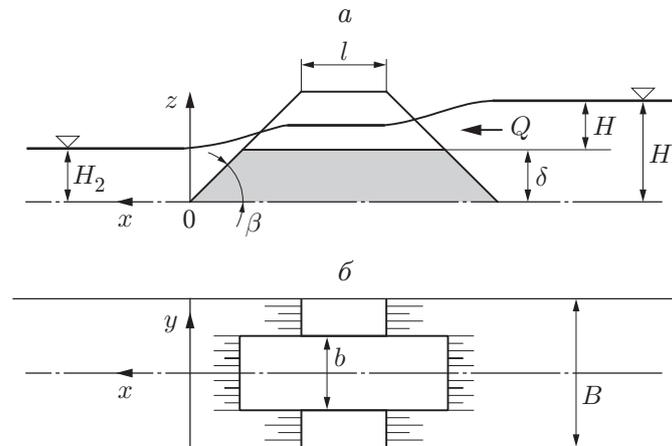


Рис. 1. Схема течения:

a — продольный разрез; b — вид сверху

профилем (угол наклона верхней и нижней граней $\beta = \pi/2$) и с трапециевидальным 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 трапециевидальным 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 β 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; α_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 , β , u с нижним индексом 1 соответствуют верхнему бьефу, с индексом 2 — нижнему бьефу. Коэффициент потерь энергии ζ 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 α_1 и α_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 ζ . В данных опытах пьезометры располагались там, где при их перемещении вдоль оси x на расстояние $\pm 10H$ изменение значений m и ζ 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 ν — 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 ν_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.

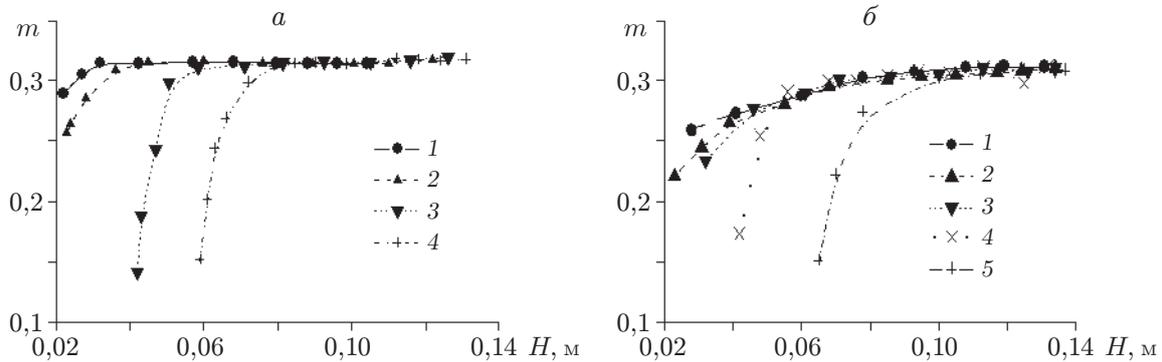


Рис. 2. Зависимость коэффициента расхода от напора:

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}/δ , 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-

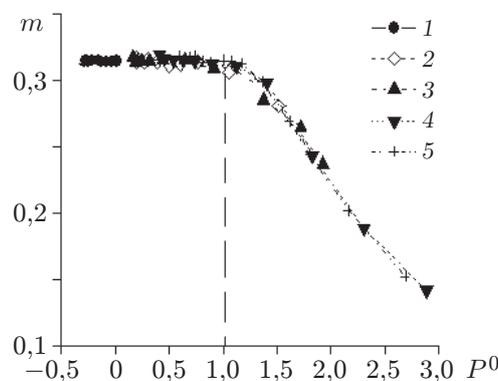


Рис. 3. Зависимость коэффициента расхода от степени подтопления для водослива с прямоугольным профилем:

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

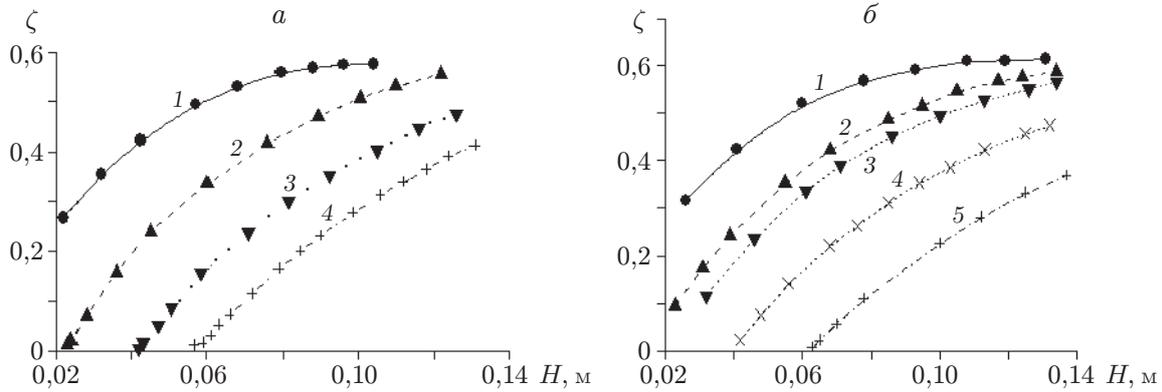


Рис. 4. Зависимость коэффициента потерь энергии от напора:

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)

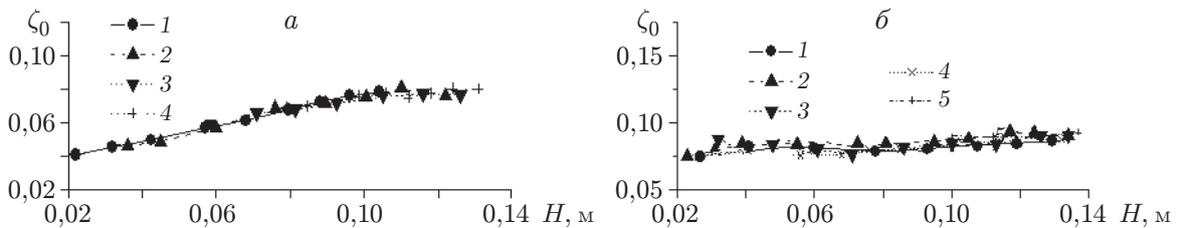


Рис. 5. Зависимость коэффициента потерь энергии на вход в проран от напора (обозначения те же, что на рис. 4)

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 ζ , 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 ζ_0 в водосливы с прямоугольным и трапецидальным профилями. Коэффициент ζ_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 , δ 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.*