

УДК 627.43:53.072.12

ВОЛНЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ ЧАСТИЧНОМ РАЗРУШЕНИИ ПЛОТИНЫ С ОБРАЗОВАНИЕМ ПРОРАНА В ВИДЕ ПРОРЕЗИ ДО ДНА КАНАЛА

А. В. Чеботников

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин),
630008 Новосибирск
E-mail: abdula111ster@gmail.com

Приведены экспериментальные данные о скорости распространения и высоте волны прорыва, возникающей в нижнем бьефе при частичном разрушении плотины. С использованием этих данных подтвержден метод расчета С. А. Христиановича.

Ключевые слова: частичное разрушение плотины, проран, коэффициент расхода, волна прорыва, скорость распространения.

Как известно, при разрушении плотины в верхнем бьефе распространяется гладкая волна понижения уровня, а в нижнем бьефе — волна прорыва. Характеристики этих волн зависят от начальных глубин верхнего и нижнего бьефов, а также от формы и размеров образовавшегося отверстия (прорана). Случай полного разрушения плотины, характерного для высоконапорных арочных плотин, достаточно хорошо изучен как теоретически [1, 2], так и экспериментально [3, 4]. Примером такого разрушения служит разрушение арочной плотины г. Мальпассе (Франция) высотой 65 м, произошедшее 2 декабря 1959 г. [5]. Однако чаще плотины разрушаются только частично. Метод расчета волн при частичном разрушении плотины предложен в [1].

В данной работе приводятся результаты экспериментального исследования волн, образующихся при частичном разрушении модельной плотины. В работах [6, 7] рассматривалась картина течения в окрестности прорана. В [8] изучались также параметры волны прорыва. В этих работах ширина прорана была существенно меньше ширины канала, а гребень прорана возвышался над дном канала. На практике чаще разрушаются грунтовые плотины и дамбы. В этом случае, как правило, образуется проран в виде относительно узкой прорези до дна канала. Именно такая форма прорана рассматривается в данной работе.

Схема эксперимента приведена на рис. 1. Опыты проводились в прямоугольном канале длиной 16 м, шириной 0,38 м и высотой 0,5 м с ровным горизонтальным дном. Выше по потоку на расстоянии 6,9 м от выхода из канала располагалась прямоугольная “плотина” с симметричной относительно стенок канала прямоугольной прорезью шириной $b = 0,06$ м. Толщина “плотины” вдоль канала $l = 0,8$ м. Начальный перепад глубин верхнего h_- и нижнего h_+ бьефов создавался с помощью вертикального щита, расположенного вблизи задней грани “плотины”. В момент времени $t = 0$ щит быстро (за $0,05 \div 0,10$ с) поднимал-

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 07-01-00015) и Федерального агентства по образованию Российской Федерации (направление 2.1.2).

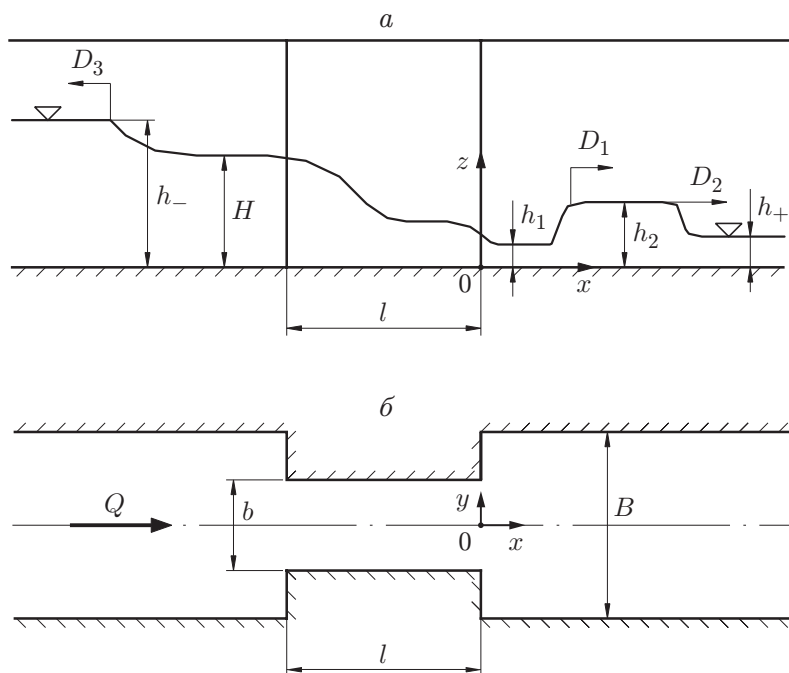


Рис. 1. Схема прорана и условные обозначения:
a — продольный разрез; *b* — вид сверху

ся вертикально вверх. Положение используемой далее прямоугольной системы координат показано на рис. 1.

Опыты показали, что в рассматриваемой задаче в зависимости от соотношения заданных параметров волна прорыва может иметь вид одного или двух движущихся друг за другом гидравлических прыжков. Такие же разновидности волны прорыва имеют место в случае распада разрыва над уступом дна канала [9–11]. Волна с одним гидравлическим прыжком далее называется волной типа А, волна с двумя прыжками — волной типа Б. На рис. 1 использованы следующие обозначения: $D_2 > 0$, $0 \leq D_1 < D_2$ и $D_3 < 0$ — скорости распространения переднего, заднего прыжков и волны понижения уровня соответственно, h_2 , h_1 — глубина за передним и задним прыжками соответственно. Переход от волны типа Б к волне типа А определяется условиями $D_1 = 0$, $h_1 = h_2$. В случае полного разрушения плотины в нижний бьеф распространяется только один гидравлический прыжок.

В соответствии с первым приближением теории мелкой воды [1, 2] прерывные волны, соответствующие гидравлическим прыжкам, мгновенно становятся стационарными, т. е. распространяются с постоянными скоростями без изменения формы. В действительности формирование стационарной картины течения происходит не мгновенно, и параметры волны прорыва выходят на постоянные значения лишь на некотором расстоянии от плотины. В проведенных экспериментах это расстояние не превышало 2 м. Параметры волн прорыва определялись при $x > 2$ м.

Колебания уровня свободной поверхности на оси симметрии канала при ряде фиксированных значений координаты x измерялись волномерами, принцип действия которых основан на значительном различии электрической проводимости воздуха и воды. Электрическая проводимость измерялась между двумя электродами, которые располагались в плоскости, перпендикулярной фронту волны. Электроды представляют собой нихромовые проволочки диаметром 0,35 мм, расположенные параллельно друг другу. Расстояние между проволочками составляет 5 мм.

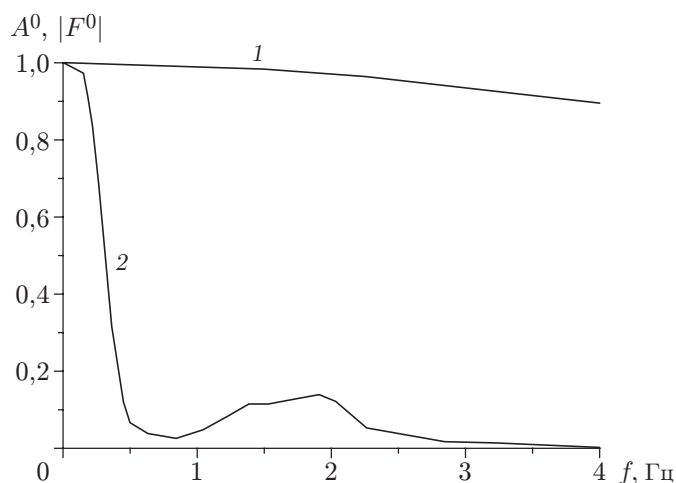


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика волномера (1) и модуль спектра волны (2) при $h_- = 37$ см, $h_+ = 14,4$ см

Статическая калибровка волномеров осуществлялась непосредственно на экспериментальной установке путем заданного ступенчатого изменения глубины покоящейся жидкости. Волномеры различали изменение уровня на величину, равную 0,3 мм, с погрешностью не более 3 %. Частотные характеристики волномеров определялись при синусоидальных колебаниях их электродов с заданной частотой в покоящейся жидкости. Установлено, что характерная собственная частота волномеров составляет 32 с^{-1} , а декремент затухания — 69 с^{-1} . Соответствующая амплитудно-частотная характеристика $A^0(f)$ (f — частота колебаний электродов) приведена на рис. 2 (кривая 1). Эта характеристика нормирована на ее значение при $f = 0$.

В ходе экспериментов выполнялся спектральный анализ изучаемых волн. Характерная зависимость модуля спектра волн, нормированного на его значение при $f = 0$, от частоты $|F^0(f)|$ приведена на рис. 2 (кривая 2). Сравнение модуля спектра волн и амплитудно-частотной характеристики волномеров показывает, что погрешность измерений, обусловленная частотой колебаний измерительной системы, не превышала 1 %. Электрические сигналы волномеров записывались на компьютер с помощью 12-разрядного аналого-цифрового преобразователя.

Для проведения расчетов с использованием метода [1] необходимо задать из эксперимента коэффициент расхода при стационарном истечении через водослив в форме прорана. Данные о коэффициентах расхода для типичных водосливов содержатся в справочниках и монографиях по гидравлике, соответствующие данные для случая истечения через прорез до дна канала ограничены [12, 13]. Поэтому измерение коэффициента расхода для рассматриваемого прорана входило в программу экспериментов. Стационарный расход измерялся с помощью стандартного мерного водослива с острым ребром, уровни верхнего и нижнего бьефов — стандартными мерными иглами.

Скорость распространения волн определялась по сигналам двух неподвижных волномеров, смещенных на заданное расстояние Δx . Эта скорость вычислялась по формуле $D_i = \Delta x_i / \Delta t_i$, где Δt_i — время перемещения на расстояние Δx_i средней по высоте точки на фронте волны.

Пример синхронной записи колебаний уровня свободной поверхности четырьмя волномерами приведен на рис. 3. По оси абсцисс отложено время t , отсчитываемое с момента выхода нижней кромки щита из воды, по оси ординат — отклонение η уровня свободной

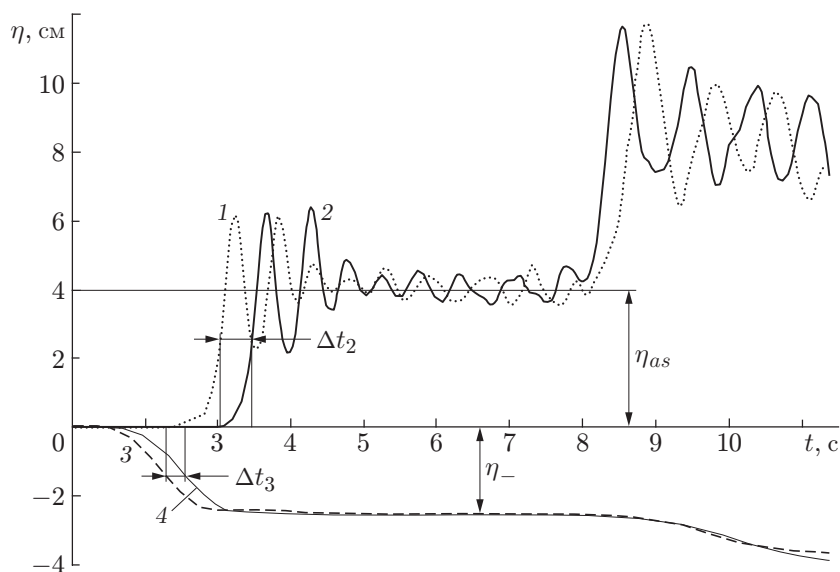


Рис. 3. Отклонение уровня свободной поверхности от начального положения ($h_- = 37$ см, $h_+ = 14,4$ см):

1 — $x = 3,21$ м; 2 — $x = 3,71$ м; 3 — $x = -2,34$ м; 4 — $x = -2,84$ м

поверхности от его начального положения. Характерные значения Δt_2 и Δt_3 , указанные на рис. 3, использовались при вычислении скоростей распространения волны прорыва и волны понижения уровня.

Волномер 1 располагался в нижнем бьефе ($x = 3,21$ м), волномер 2 — там же на расстоянии от волномера 1 $\Delta x = 0,5$ м. Записи сигналов этих волномеров приведены на рис. 3 (кривые 1, 2 соответственно). Первое повышение уровня, регистрируемое волномерами 1, 2, обусловлено прохождением волны прорыва, второе повышение — приходом отраженной волны. За передним фронтом волны прорыва возникают значительные ондуляции. На рис. 3 показана характерная высота волны прорыва η_{as} . По этой величине и начальной глубине нижнего бьефа h_+ вычислялась асимптотическая глубина за передним фронтом волны прорыва $h_{as} = h_+ + \eta_{as}$.

Волномеры 3, 4, располагавшиеся в верхнем бьефе на расстояниях $x_3 = -2,34$ м и $x_4 = -2,84$ м (кривые 3, 4 на рис. 3), регистрировали волну понижения уровня. Вторичное понижение уровня, регистрируемое этими волномерами, обусловлено тем, что длина верхнего бьефа в опытах была конечной.

Из рис. 3 следует, что картина течения в окрестности прорези достаточно быстро становится стационарной, хотя в целом течение остается нестационарным за счет непрерывного вовлечения в движение новых порций покоящейся жидкости. Это подтверждает используемое в методе [1] предположение о том, что расход жидкости, поступающей в нижний бьеф, можно вычислить по коэффициенту расхода для водослива в форме прорана при стационарном истечении через него.

Экспериментальные данные о коэффициенте расхода при стационарном истечении через рассматриваемый проран приведены на рис. 4. По оси абсцисс отложена глубина перед прораном H в размерном виде. Это обусловлено тем, что в задаче об истечении через водосливы, как правило, имеется несколько геометрических параметров, и составить из них универсальный безразмерный комплекс (аргумент) не представляется возможным. Сплошная линия на рис. 4 получена аппроксимацией экспериментальных значений по формуле

$$m = 0,385 - 0,033H - 0,557H^2$$

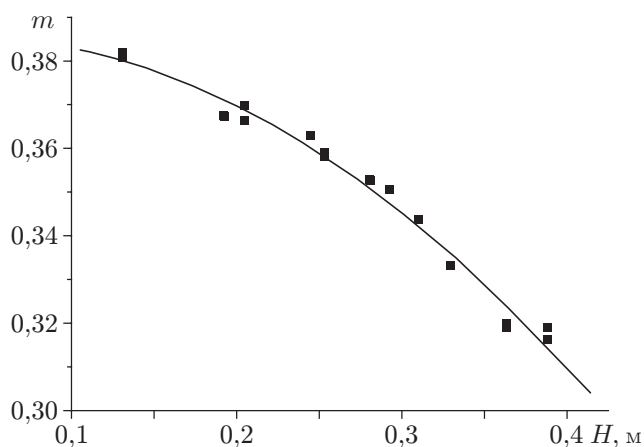


Рис. 4

Рис. 4. Зависимость коэффициента расхода прорана от напора:
 точки — экспериментальные данные; линия — аппроксимация

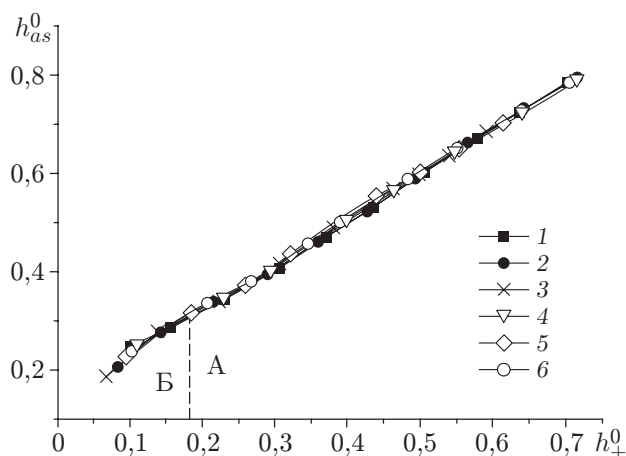


Рис. 5

Рис. 5. Глубина за передним фронтом волны прорыва:

1 — $h_- = 17,7$ см; 2 — $h_- = 21,5$ см; 3 — $h_- = 25,4$ см; 4 — $h_- = 28,6$ см; 5 — $h_- = 33,1$ см; 6 — $h_- = 37$ см; вертикальная штриховая линия — граница областей существования волн типа А и Б

с помощью метода наименьших квадратов. В этой формуле величина H измеряется в метрах. Данные, приведенные на рис. 4, хорошо согласуются с данными [13]. Конкретные размеры рассматриваемой в данной работе прорези оказывают влияние только на значения коэффициентов в приведенной формуле.

Следует учитывать, что в задаче о частичном разрушении плотины стационарный расход жидкости, поступающей в нижний бьеф, определяется не начальной глубиной верхнего бьефа h_- , а величиной $H = h_- - \eta_-$, где η_- — асимптотическое понижение уровня перед прораном (см. рис. 3). Метод расчета величины η_- , предложенный в [1], получил подтверждение в данных опытах.

На рис. 5 приведены экспериментальные зависимости глубины $h_{as}^0 = h_{as}/h_-$ за передним фронтом волны прорыва от начальной глубины нижнего бьефа $h_+^0 = h_+/h_-$. Если пренебречь относительно малыми колебаниями уровня свободной поверхности, которые имеют место в опытах после вырождения ондуляций, то глубина h_{as} будет иметь то же значение, что и расчетная глубина h_2 (см. рис. 1). Опыты выполнены при шести значениях h_- . Безразмерные параметры B/h_- , b/h_- , l/h_- (B — ширина канала) изменялись в следующих диапазонах: $1,00 \leq B/h_- \leq 2,15$, $0,16 \leq b/h_- \leq 0,34$, $2,16 \leq l/h_- \leq 4,52$. Из рис. 5 следует, что величина h_{as}^0 практически не зависит от h_- в рассмотренном диапазоне значений этого параметра.

Полученные в экспериментах безразмерные скорости распространения переднего фронта волны прорыва $D_2^0 = D_2/(gh_-)^{1/2}$ приведены на рис. 6. Разброс экспериментальных значений D_2^0 , полученных при различных значениях безразмерных параметров прорези, более существен, чем разброс значений h_{as}^0 . Однако если допустима погрешность, не превышающая 5 %, то этим разбросом можно пренебречь.

Полученные экспериментальные данные могут использоваться для проверки различных методов расчета. На рис. 7, 8 приведены результаты одной из серий опытов и расчетов с использованием метода [1]. В расчетах, выполненных с помощью этого метода, немного

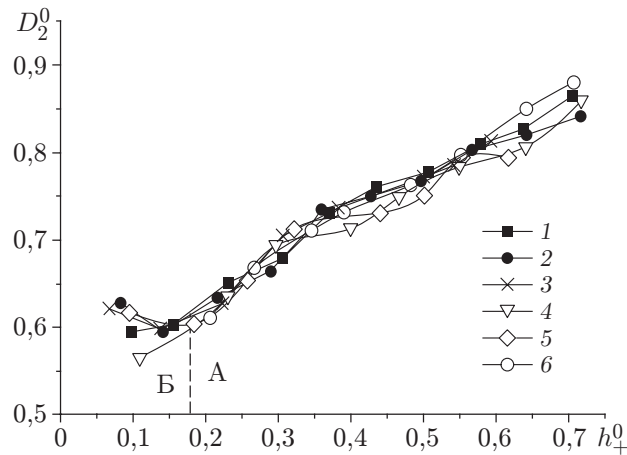


Рис. 6. Скорость распространения переднего фронта волны прорыва (обозначения те же, что на рис. 5)

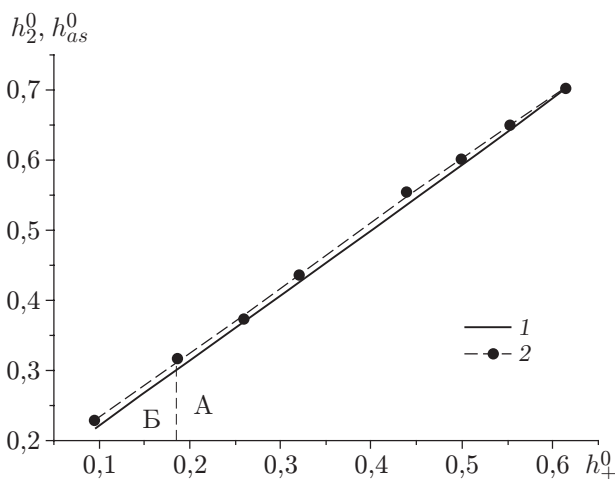


Рис. 7

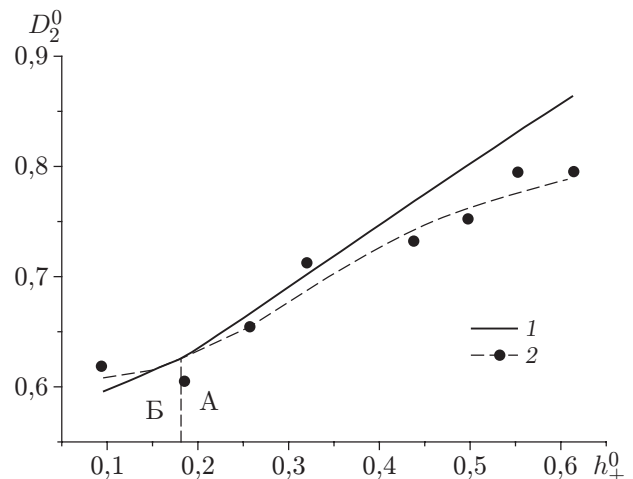


Рис. 8

Рис. 7. Глубина за передним фронтом волны прорыва при $h_- = 33,1$ см:
1 — результаты расчета с использованием метода [1]; 2 — экспериментальные данные;
вертикальная штриховая линия — граница областей существования волн типа А и Б

Рис. 8. Скорость распространения переднего фронта волны прорыва при $h_- = 33,1$ см (обозначения те же, что на рис. 7)

завышена скорость распространения переднего фронта волны прорыва и занижена глубина за передним фронтом. Однако различие результатов можно считать незначительным. Аналогичные результаты получены при сравнении имеющихся данных с данными, полученными в других сериях выполненных опытов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Христианович С. А. Неустановившееся движение в каналах и реках // Христианович С. А., Михлин С. Г., Девисон Б. Б. Некоторые новые вопросы механики сплошной среды. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1938. С. 15–154.
2. Стокер Дж. Дж. Волны на воде. М.: Изд-во иностр. лит., 1959.

3. **Dressler R. F.** Comparison of theories and experiments for the hydraulic dam-break wave // Intern. Assoc. Sci. Hydrology. 1954. V. 3, N 38. P. 319–328.
4. **Букреев В. И., Гусев А. В., Малышева А. А., Малышева И. А.** Экспериментальная проверка газогидравлической аналогии на примере задачи о разрушении плотины // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2004. № 5. С. 143–152.
5. **Valiani A., Caleffi V., Zanni A.** Case study: malpasset dam-break simulation using a two-dimensional finite volume method // J. Hydraulic Engng. 2002. V. 128, pt 5. P. 460–472.
6. **Букреев В. И.** О глубине воды в проране при частичном разрушении плотины // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2005. № 5. С. 115–123.
7. **Букреев В. И.** О расходной характеристике в створе плотины после ее разрушения // ПМТФ. 2006. Т. 47, № 5. С. 77–87.
8. **Чеботников А. В.** Волны при частичном разрушении плотины. Эксперимент // Изв. вузов. Стр-во. 2008. № 2. С. 57–62.
9. **Остапенко В. В.** О разрывных решениях уравнений “мелкой воды” над уступом дна // ПМТФ. 2002. Т. 43, № 6. С. 62–74.
10. **Букреев В. И., Гусев А. В.** Гравитационные волны при распаде разрыва над уступом дна открытого канала // ПМТФ. 2003. Т. 44, № 4. С. 64–75.
11. **Букреев В. И., Гусев А. В., Остапенко В. В.** Распад разрыва свободной поверхности жидкости над уступом дна канала // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2003. № 6. С. 72–83.
12. **Чугаев Р. Р.** Гидравлика. Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982.
13. **Справочник** по гидравлическим расчетам / Под ред. П. Г. Киселева. М.: Энергия, 1972.

Поступила в редакцию 21/II 2008 г.
