

УДК 626.4:53.072.12

ГЛУБИНА НАД УСТУПОМ ДНА КАНАЛА ПОСЛЕ РАСПАДА РАЗРЫВА УРОВНЯ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

А. В. Гусев

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск
E-mail: bukreev@hydro.nsc.ru

Приведены экспериментальные данные о глубине над уступом дна прямоугольного канала после удаления щита, создающего начальный перепад уровней свободной поверхности. Показано, что при достаточно большой высоте уступа эта глубина примерно на 40 % меньше, чем получено в первом приближении теории мелкой воды.

Ключевые слова: ровное дно, сухое и обводненное дно, подтопленный и неподтопленный режимы, гидравлический прыжок, волна понижения уровня.

Рассматриваемые в данной работе гидродинамические процессы характерны, например, для аварий на судоходных шлюзах, обусловленных разрушением ворот между камерами. Одной из существенных особенностей постановки соответствующей научной задачи по сравнению с классической задачей о разрушении плотины является то, что в створе ворот шлюза имеется уступ — резкое понижение дна от верхней камеры к нижней. При этом гидродинамические процессы в верхней и нижней камерах в значительной мере контролируются характером течения непосредственно над уступом. Существенно различаются, в частности, подтопленный и неподтопленный режимы сопряжения бьефов. По определению [1] режим сопряжения называется неподтопленным, если процессы в верхнем бьефе не зависят от процессов в нижнем бьефе. Это имеет место в том случае, когда глубина непосредственно над уступом h_0 меньше критической глубины $h_* = (q^2/g)^{1/3}$ (q — удельный расход; g — ускорение свободного падения). Различают также придонный и поверхностный режимы сопряжения бьефов [1]. В стационарном течении за уступом смена этих режимов происходит, когда $h_0 \approx h_*/1,3$ [2]. Глубина h_0 определяет также форму волны понижения уровня в верхнем бьефе.

В [3] для анализа гидродинамических процессов после разрушения ворот судоходного шлюза предложено использовать первое приближение теории мелкой воды. Этот же подход развивается в [4]. В [3] подтопленный режим не рассматривается, но в число искомых функций входят высота и скорость распространения волны, отраженной от уцелевших ворот в нижнем бьефе. В [4] рассматривается и подтопленный режим, но канал безграничен вверх и вниз по потоку. Результаты экспериментальной проверки работы [3] приведены в [5], работы [4] — в [6].

Ранее первое приближение теории мелкой воды использовалось при решении задачи о разрушении плотины в канале с ровным дном (см., например, [7, 8]). В задаче о разрушении ворот судоходного шлюза в классическую постановку [7, 8] необходимо добавить условия сопряжения над уступом. В [3, 4] для этой цели в дополнение к законам сохранения массы и количества движения привлекается закон сохранения энергии.

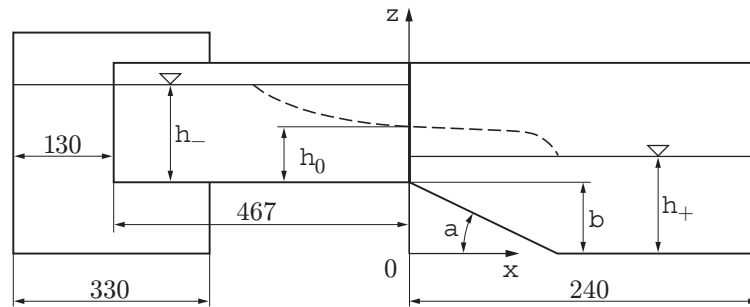


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (размеры в см)

Согласно [3, 4] в неподтопленном режиме глубина над уступом $h_0 = h_*$. Опыты [5], выполненные при одном значении высоты уступа, дали существенное отклонение от этого результата. Вместе с тем в случае ровного дна в створе плотины действительно устанавливается критическая глубина h_* . В данной работе приводится более детальная экспериментальная информация для уступов различной высоты и формы, включая случай разрушения плотины над ровным дном, когда высота уступа $b = 0$.

Опыты проводились в канале прямоугольного поперечного сечения шириной 20,2 см с открытым левым и закрытым правым концами. Открытый конец сопрягался с бассейном шириной 1 м и длиной 3,3 м, как показано на рис. 1. На расстоянии 4,67 м от открытого конца вниз по потоку начиналось понижение отметки дна канала по линейному закону с одного постоянного значения на другое. В этом поперечном сечении канала, которое принимается далее за начало отсчета продольной координаты x , создавался начальный перепад уровней свободной поверхности с помощью вертикального щита (см. рис. 1). В момент времени $t = 0$ щит удалялся вверх рычагом. Закон движения щита регистрировался реохордным датчиком. Время выхода из воды нижней кромки щита не превышало 0,05 с.

Начальные глубины верхнего h_- и нижнего бьефа h_+ (см. рис. 1) измерялись с помощью мерных игл с абсолютной погрешностью не более 0,02 см, глубины в других поперечных сечениях канала (в частности, в створе щита h_0) — с помощью волномеров. Принцип работы волномеров основан на различии электрической проводимости воды и воздуха. Разрешающая способность волномеров, определенная по удвоенному среднеквадратичному значению их собственных шумов, составляла 0,02 см. Верхняя граница частоты колебаний, отслеживаемая волномерами с погрешностью не более 10 %, равнялась примерно 10 Гц. Электрические сигналы реохордного датчика и волномеров вводились в компьютер с помощью стандартного 8-канального аналого-цифрового преобразователя ACL-8112. При аналого-цифровом преобразовании шаг по времени не превышал 0,008 с. Суммарная случайная погрешность измерений оценивалась по результатам многократных измерений в одинаковых условиях. Среднеквадратичное значение этой погрешности не превышало размера экспериментальных точек на приводимых ниже графиках.

Основными внешними параметрами задачи являются h_- , h_+ , g , высота b и угол наклона уступа α (см. рис. 1). На больших временах существенное значение имеют также длины участков от щита до открытого и закрытого концов канала, геометрические параметры бассейна в головной части канала и потери энергии на трение о дно и стенки канала. Изучаемая величина h_0 является сложной функцией этих параметров и времени. По каждому из ее аргументов имеются критические условия в том смысле, что в окрестности определенных значений аргумента происходят быстрые изменения h_0 , связанные с изменениями картины течения. В частности, по параметру h_+ имеют место сильно различающиеся процессы распространения волны по сухому и обводненному дну, подтопленный

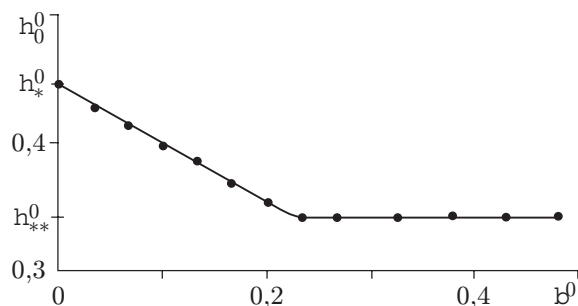


Рис. 2. Экспериментальная зависимость глубины в створе щита от высоты порога ($h_- = 15$ см, $h_+^0 = 0$ (сухое дно); $\alpha = 90^\circ$)

и неподтопленный, придонный и поверхностный режимы сопряжения бьефов, режимы с прилипшей и отжатой струей или с воздушной каверной в окрестности уступа [9].

Согласно [3, 4] после удаления щита глубина h_0 мгновенно переходит с h_- на меньшее постоянное значение, причем в неподтопленном режиме, как и в случае разрушения плотины над ровным дном, это постоянное значение равно критической глубине

$$h_* = 4h_-/9.$$

В эксперименте переход с h_- на меньшее постоянное значение происходит не мгновенно, хотя и достаточно быстро. В данных опытах время выхода h_0 на постоянное значение не превышало 0,35 с. Это постоянное значение сохранялось, пока возмущение не распространялось до одного из концов канала, что приводило к изменению граничных условий. Особенно быстро h_0 реагирует на изменение граничных условий у открытого конца канала, поскольку течение в верхнем бьефе является докритическим. В случае ровного дна и неподтопленного режима течение в нижнем бьефе является сверхкритическим и изменение граничных условий на закрытом конце канала в h_0 не проявляется. Сильные изменения h_0 начинаются в моменты прихода в створ щита отраженных волн.

Далее приводятся результаты измерений h_0 на тех интервалах времени, когда эта величина была постоянной. Для этой постоянной величины используется обозначение h_0 . При представлении в безразмерном виде в качестве характерного линейного масштаба взята начальная глубина h_- . Безразмерные величины отмечены верхним индексом нуль.

На рис. 2 приведена зависимость h_0^0 от b^0 при постоянных значениях h_- , h_+ и α . Экспериментальные точки на этом рисунке получены при внезапном понижении дна ($\alpha = 90^\circ$) и неподтопленном режиме сопряжения бьефов для всех значений b^0 , включая случай ровного дна ($b^0 = 0$). Отрезками горизонтальных штриховых линий показаны значения $h_*^0 = 4h_-/9$ и $h_{**}^0 \approx h_*^0/1,3$.

Недавно было установлено экспериментально (см., например, [2, 10]), что величина h_{**} наряду с h_* выступает в качестве еще одного критического параметра в ряде задач гидравлики открытых каналов. В частности, именно эта глубина устанавливается на выходе из канала в атмосферу [10], а также служит удобным параметром при идентификации различных форм гидравлического прыжка и перехода от придонного к поверхностному режиму сопряжения бьефов [2]. В связи с этим в [2, 10] для h_{**} используется термин “вторая критическая глубина”.

Экспериментальные данные на рис. 2 показывают, что основанный на первом приближении теории мелкой воды результат $h_0^0 = h_*^0$ (в неподтопленном режиме) подтвердился только в случае ровного дна, а при $b^0 > 0,23$ в створе щита установилась не первая, а вторая критическая глубина. Следует ожидать, что с увеличением b^0 за пределы изученных

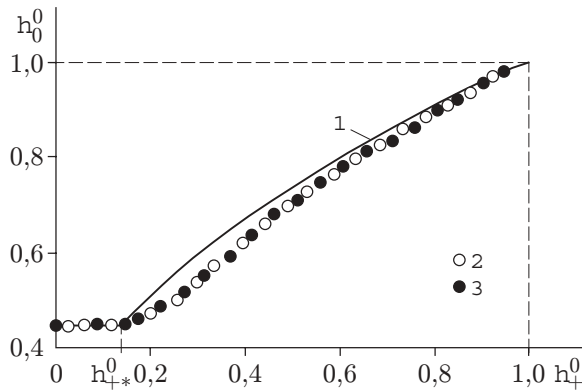


Рис. 3

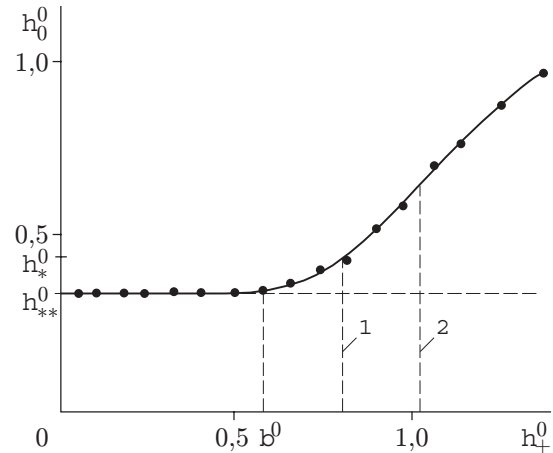


Рис. 4

Рис. 3. Зависимость глубины в створе щита от глубины нижнего бьефа в случае ровного дна ($b^0 = 0$):

1 — теория [8]; 2, 3 — эксперимент при $h_- = 15$ и 22 см соответственно

Рис. 4. Зависимость глубины в створе щита от глубины нижнего бьефа при наличии уступа ($h_- = 12,5$ см, $b^0 = 0,576$, $\alpha = 90^\circ$):

1, 2 — верхняя граница неподтопленного режима (эксперимент и теория [3] соответственно)

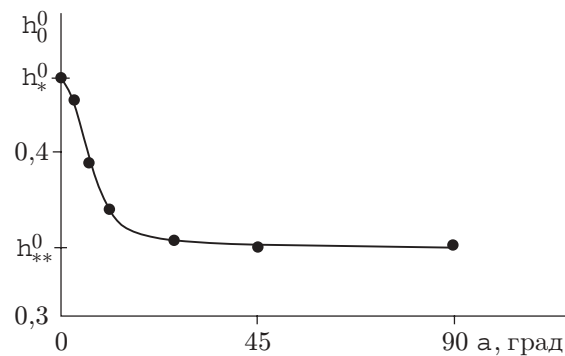


Рис. 5. Экспериментальная зависимость глубины в створе щита от α ($h_- = 15$ см, $b^0 = 0,48$, $h_+^0 = 0,133$ (неподтопленный режим))

в опытах значений обнаруженная закономерность сохранится, поскольку она имеет место и при выходе потока из канала в атмосферу ($b^0 \rightarrow \infty$) [10].

На рис. 3 приведена зависимость $h_0^0(h_+^0)$ при $b^0 = 0$ (ровное дно) как в подтопленном, так и в неподтопленном режимах. Согласно [8] в неподтопленном режиме (в частности, в случае сухого дна, когда $h_+^0 = 0$) $h_0^0 = h_0^*$, причем верхняя граница неподтопленного режима определяется условием $h_+^0 = h_{+*}^0 \approx 0,138$. Эти результаты хорошо подтвердились. В подтопленном режиме экспериментальное значение h_0^0 меньше теоретического. Расхождение не превышает 10 %.

На рис. 4 приведен пример зависимости h_0^0 от h_+^0 при $b^0 = 0,576$ и $\alpha = 90^\circ$. При таком значении b^0 существует диапазон значений параметра h_+^0 , в котором, в отличие от полученного в [3, 4], над уступом устанавливается не первая, а вторая критическая глубина

(см. рис. 2). В данном примере это имело место при $h_+^0 < b^0$. При наличии уступа экспериментальные данные существенно расходятся с [3, 4] и по верхней границе неподтопленного режима. Согласно [3, 4] этой границе соответствует $h_{+*}^0 = b^0 + h_*^0$. В эксперименте получено $h_{+*}^0 \approx b^0 + 0,5h_*^0$.

На рис. 5 приведена экспериментальная зависимость $h_0^0(\alpha)$ при фиксированных значениях других параметров. Теоретически эта зависимость не изучалась. С точки зрения допущений первого приближения теории мелкой воды чем меньше α , тем лучше. Пример на рис. 5 показывает, что экспериментальные точки заметно отклонились от зависимости $h_0^0 = h_*^0$ даже при $\alpha = 3^\circ$, а при $\alpha > 30^\circ$ над уступом установилась не первая, а вторая критическая глубина.

Автор выражает благодарность В. И. Букрееву за помощь при интерпретации результатов опытов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Киселев П. Г.** Справочник по гидравлическим расчетам. М.: Госэнергоиздат, 1957.
2. **Букреев В. И.** Ондюлярный прыжок при обтекании открытым потоком порога в канале // ПМТФ. 2001. Т. 42, № 4. С. 40–47.
3. **Атавин А. А., Васильев О. Ф.** Оценка возможных последствий аварий на судоходном шлюзе, связанных с разрушением затворов его камер // Тез. докл. междунар. симп. “Гидравлические и гидрологические аспекты надежности и безопасности гидротехнических сооружений”, Санкт-Петербург, 28 мая — 1 июня 2002 г. СПб.: Всерос. науч.-исслед. ин-т гидротехники, 2002. С. 121.
4. **Остапенко В. В.** Течения, возникающие при разрушении плотины над уступом дна // ПМТФ. 2003. Т. 44, № 6. С. 107–122.
5. **Букреев В. И., Гусев А. В.** Гравитационные волны при распаде разрыва над уступом дна открытого канала // ПМТФ. 2003. Т. 44, № 4. С. 64–75.
6. **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. 72–82.
7. **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.
8. **Стокер Дж. Дж.** Волны на воде. Математическая теория и приложения. М.: Изд-во иностр. лит., 1969.
9. **Букреев В. И., Гусев А. В.** Каверны за водосливом с широким порогом // ПМТФ. 2002. Т. 43, № 2. С. 129–135.
10. **Букреев В. И., Гусев А. В.** Волны за ступенькой в открытом канале // ПМТФ. 2003. Т. 44, № 1. С. 62–70.

*Поступила в редакцию 21/XI 2003 г.,
в окончательном варианте — 19/I 2004 г.*