

УДК 532.59

## ЗАПЛЕСК ВОДЫ НА ВЕРТИКАЛЬНУЮ СТЕНКУ ПРИ РАСПАДЕ РАЗРЫВА НАД УСТУПОМ

В. И. Букреев

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

Приведены экспериментальные данные о высоте заплеска на вертикальную стенку в процессе отражения волн, образующихся при распаде разрыва над ровным дном и уступом на дне канала. Показано, что для волн типа бора с вальцом в головной части, распространяющихся по воде конечной глубины, заплеск пропорционален начальному перепаду уровней свободной поверхности. В случае “сухого дна” в нижнем бьефе эта закономерность распространяется и на другие виды волн, образующихся при распаде разрыва.

Ключевые слова: эксперимент, открытый канал, волны типа бора, вертикальная стенка, высота заплеска.

В гидравлике распадом граничного разрыва (сокращенно распадом разрыва) называется процесс движения жидкости со свободной поверхностью после удаления вертикальной перегородки, разделявшей до этого два покоящихся слоя [1, 2] (рис. 1). Далее определяется только осредненная по ширине канала высота заплеска жидкости на вертикальную стенку  $H$  — расстояние от дна канала до границы смоченной поверхности на вертикальной стенке. Следует отметить, что при достаточно больших значениях начального перепада уровней  $P$  часть жидкости отрывается от стенки и поднимается в воздух в виде отдельных струй и капель. Этот процесс при определении  $H$  не учитывается.

Данная работа является продолжением работ [3, 4], в которых экспериментально изучался заплеск жидкости на вертикальную стенку в случае распада разрыва над ровным горизонтальным дном. Рассматривается более общая постановка задачи, когда на горизонтальном дне прямоугольного канала имеется уступ (резкое понижение дна вниз по потоку) высотой  $b$ , над которым создается начальный перепад (разрыв) уровней свободной поверхности. Для сравнения изучался также распад разрыва над ровным дном ( $b = 0$ ). Обзор ранее выполненных исследований содержится в [3, 4]. Следует отметить опыты [5, 6], в которых изучался заплеск на вертикальную стенку волн, образующихся при кратковременном удалении перегородки над ровным дном. В [5, 6] основное внимание уделялось изучению заплеска уединенных волн. В [3, 4] и в данной работе волны имели вид движущегося гидравлического прыжка (бора). Как показано в [3], картины заплеска на вертикальную стенку гладкого ондулярного бора и уединенных волн имеют много общего.

Решение задачи о распаде разрыва над ровным дном используется при анализе последствий разрушения плотины [1, 7], а распад разрыва над уступом представляет интерес при анализе аварийных ситуаций на судоходном шлюзе [8].

Опыты выполнялись в прямоугольном канале шириной  $B = 20,2$  см. Уступ высотой  $b$  располагался на расстоянии  $l = 1,93$  м от правого закрытого конца канала (рис. 1). Левый

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 01-01-00846) в рамках Программы поддержки ведущих научных школ России (код проекта 00-05-98542) и Федеральной целевой программы “Интеграция науки и высшего образования России” (грант № И0931).

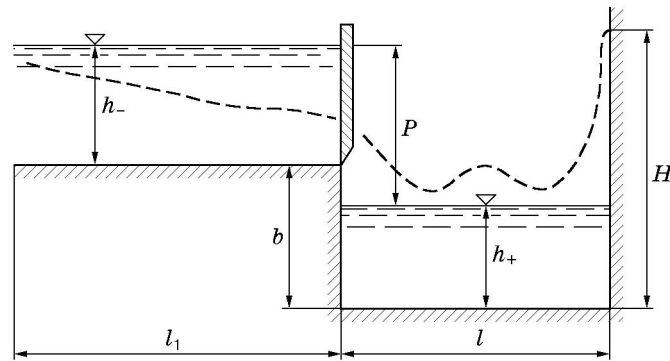


Рис. 1. Схема эксперимента

открытый конец канала присоединялся к бассейну длиной 3,3 м и шириной 1 м, расположенному на расстоянии  $l_1 = 2,27$  м от уступа. Таким способом имитировались условия, типичные для судоходного шлюза, перед которым имеется аванпорт с большой площадью свободной поверхности. Далее рассматриваются только такие интервалы времени с момента начала распада разрыва, в которые волна, отраженная от свободного конца, еще не добегала до рассматриваемого поперечного сечения канала.

Глубина покоящейся жидкости перед уступом  $h_-$  задавалась с помощью плоского щита, расположенного над уступом (рис. 1). Глубина покоящейся жидкости за уступом обозначается далее через  $h_+$ . Рассматриваются случаи  $h_+ \neq 0$  и  $h_+ = 0$ . Для случая  $h_+ = 0$  используется термин “сухое дно”. Перепад уровней свободной поверхности  $P = h_- + b - h_+$  характеризует начальную энергию жидкости. В момент времени  $t = 0$  щит удалялся из канала вручную. Закон его движения регистрировался реохордным датчиком. Измерения выполнялись только в том случае, когда время удаления перегородки не превышало 0,05 с при наименьшем значении времени распространения волны от уступа до вертикальной стенки, составлявшем в опытах около 1,3 с.

Вблизи закрытого конца канала располагалась съемная вертикальная пластина из оргстекла, на которую наносился зубной порошок. При отражении волн зубной порошок смывался, и на пластине оставался четкий след между смоченной и несмоченной ее частями, по которому определялось значение  $H$ . При больших значениях  $P$  высота смоченной части пластины меняется по ширине канала [4, 6]. Далее приводятся только осредненные по ширине канала значения  $H$ . Параметры  $h_-$ ,  $h_+$  и  $b$  варьировались. Параметры  $B$ ,  $l$  и  $l_1$  не менялись.

Высота заплеска зависит от вида набегающих волн. Типичные формы (профили) свободной поверхности вниз по потоку от уступа, наблюдавшиеся в опытах до момента отражения волны от закрытого конца канала, показаны на рис. 2. Для профиля, представленного на рис. 2,а, характерно то, что поток набегаёт на стенку, находясь в сверхкритическом состоянии (в неподвижной системе координат). На профиле, приведенном на рис. 2,б, имеется два классических гидравлических прыжка (бора) с вальцом в головной части, движущихся вниз по потоку, причем скорость распространения переднего прыжка больше скорости распространения заднего. На профиле, показанном на рис. 2,в, имеется только один классический движущийся гидравлический прыжок. В схеме, представленной на рис. 2,г, за вальцом классического бора имеются относительно слабые ондуляции. В схеме на рис. 2,д ондуляции являются главной особенностью профиля свободной поверхности, но сохраняется и валец в головной части. Такую волну целесообразно назвать ондулярным бором с обрушивающимся передним фронтом. Профиль на рис. 2,е соответствует волне, которую можно назвать гладким ондулярным бором.

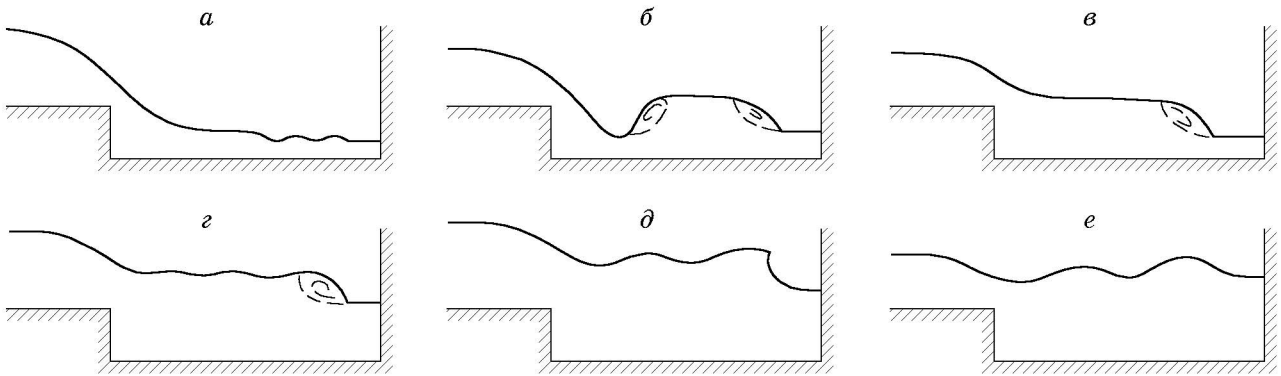


Рис. 2. Типичные формы волн на подходе к стенке

Схемы, приведенные на рис. 2, не исчерпывают всех возможных форм профилей свободной поверхности в рассматриваемой задаче даже при отсутствии наложения прямых и отраженных волн. Например, при достаточно больших значениях  $l$ ,  $l_1$  и  $P$  можно последовательно наблюдать все указанные выше профили, а также уединенные и линейные волны, которые образуются на конечных стадиях вырождения ондулярного бора [9]. Кроме того, на стадии перехода от классического бора к гладкому ондулярному бору можно выделить больше характерных промежуточных форм профилей, чем показано на рис. 2, г, д [10]. Расчетами на основе уравнений Сен-Венана (см., например, [2]) можно получить только первые три формы бора на рис. 2. Для описания других профилей нужно использовать математические модели, учитывающие отклонение от гидростатического закона распределения давления по глубине и процесс перемешивания при обрушении волн.

При отражении гладкого ондулярного бора (рис. 2, е) высота смоченной поверхности не менялась по ширине канала. При отражении классического бора с вальцом в головной части (рис. 2, б, в) эта граница была неровной, но струи в воздух не вылетали. В случае промежуточных форм (рис. 2, г, д) неровность границы существенно увеличивалась, и происходил отрыв струй от стенки. При прочих равных условиях наибольшая высота заплеска  $H$  имела место, когда согласно схеме, представленной на рис. 2, д, обрушение гладкого ондулярного бора начиналось при подходе его переднего фронта к вертикальной стенке.

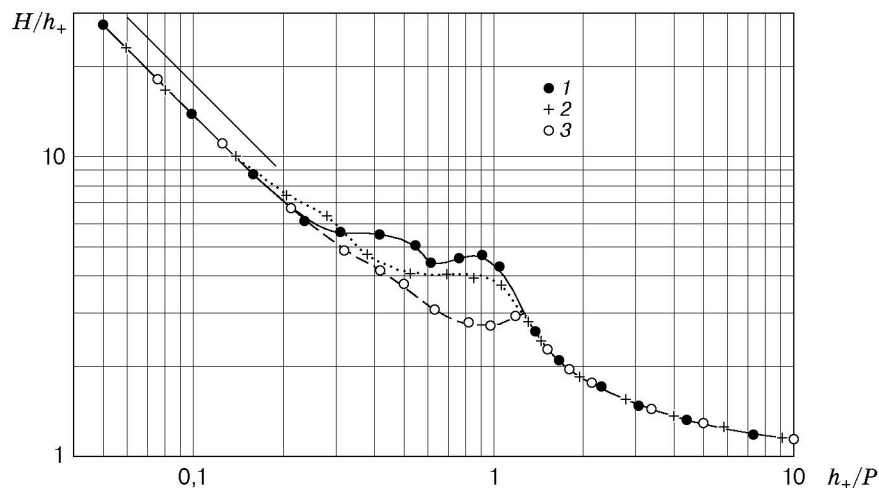


Рис. 3. Заплеск при распаде разрыва над ровным дном ( $b/l = 0$ ):  
 1 —  $h_-/l = 0,11$ ; 2 —  $h_-/l = 0,079$ ; 3 —  $h_-/l = 0,053$

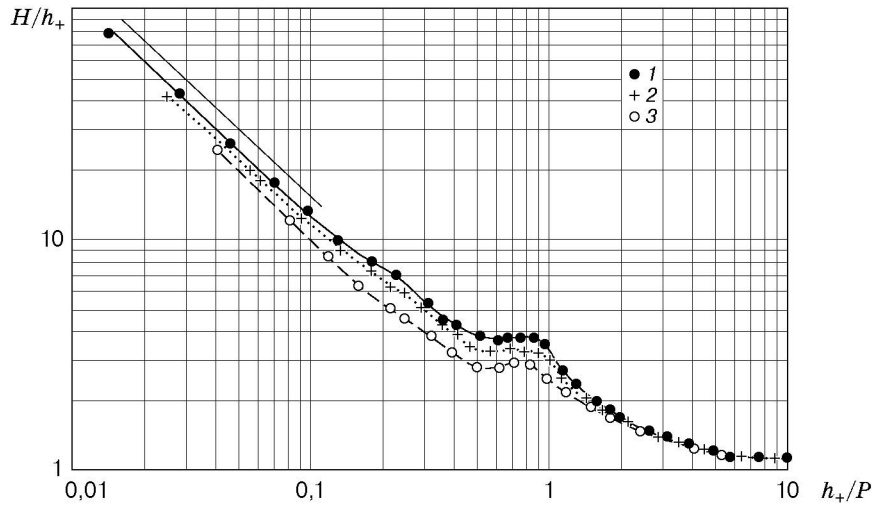


Рис. 4. Заплеск при распаде разрыва над уступом высотой  $b/l = 0,026$ :  
 1 —  $h_-/l = 0,080$ ; 2 —  $h_-/l = 0,062$ ; 3 —  $h_-/l = 0,039$

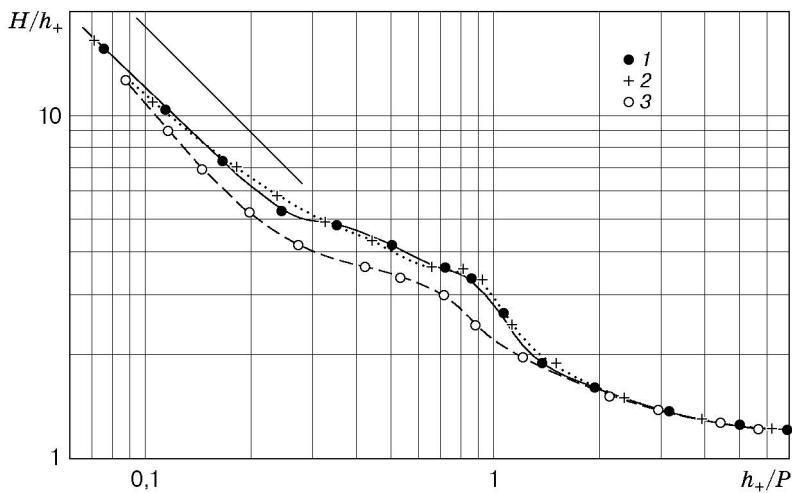


Рис. 5. Заплеск при распаде разрыва над уступом высотой  $b/l = 0,037$ :  
 1 —  $h_-/l = 0,080$ ; 2 —  $h_-/l = 0,062$ ; 3 —  $h_-/l = 0,039$

На рис. 3 приведена зависимость относительного заплеска  $H/h_+$  от глубины за уступом  $h_+/P$  при  $h_+ \neq 0$  в случае распада разрыва над ровным дном ( $b = 0$ ). Из рис. 3 следует, что при больших и малых значениях  $h_+/P$  имеет место универсальность рассматриваемой зависимости по параметру  $h_-/l$ . При промежуточных значениях  $h_-/l$  универсальность нарушается, что обусловлено формой набегающих волн. При малых значениях  $h_+/P$  волна имела вид классического бора с вальцом в головной части. В этом случае  $H/h_+ \sim (h_+/P)^{-1}$  (сплошная прямая линия на рис. 3–5). Универсальность при больших значениях  $h_+/P$  имеет место, когда набегающая волна имеет вид гладкого ондулярного бора. Для других форм волн, показанных на рис. 2, высота заплеска на рис. 3 зависит от всех параметров.

Экспериментальные данные о заплеске при распаде разрыва над уступом приведены на рис. 4, 5 для двух значений  $b/l$  и  $h_+ \neq 0$ . В этом случае зависимость  $H/h_+$  от  $h_+/P$  аналогична той же зависимости при распаде разрыва над ровным дном. Однако за уступом происходит дополнительная диссипация энергии, возрастающая с ростом  $b/P$  и

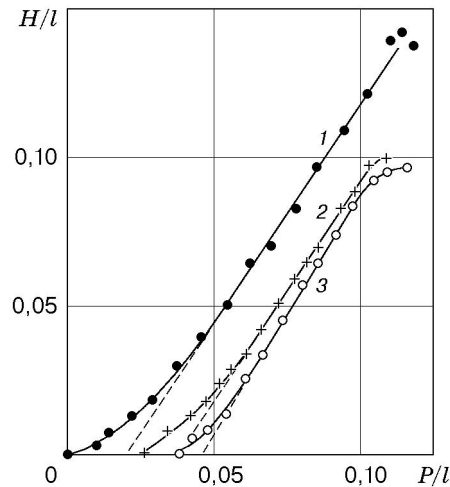


Рис. 6. Заплеск при распространении волн по сухому дну:

1 —  $b/l = 0$ ,  $a = 1,45$ ,  $c = 0,028$ ; 2 —  $b/l = 0,026$ ,  $a = 1,50$ ,  $c = 0,057$ ; 3 —  $b/l = 0,036$ ,  
 $a = 1,61$ ,  $c = 0,074$

уменьшением  $h_+/P$ . В результате при прочих равных условиях область существования волн, показанных на рис. 2, г, д, смещается в сторону малых значений  $h_+/P$  и величина заплеска уменьшается.

Результаты опытов, в которых волна распространялась по сухому дну ( $h_+ = 0$ ), представлены на рис. 6. Видно, что и в случае ровного дна, и при наличии уступа существует диапазон параметров, в котором зависимость  $H$  от  $P$  является линейной (штриховые линии на рис. 6):

$$H/l = aP/l - c.$$

Коэффициенты  $a$  и  $c$  зависят от перепада уровней свободной поверхности, высоты уступа и расстояния от уступа до стенки (рис. 6).

Автор выражает благодарность А. В. Гусеву и Е. М. Романову за помощь в проведении опытов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Атавин А. А., Гладышев М. Т., Шугрин С. М. О разрывных течениях в открытых руслах // Динамика сплошной среды: Сб. науч. тр. / АН СССР. Сиб. отд-ние. Ин-т гидродинамики. 1975. Вып. 22. С. 37–64.
2. Остапенко В. В. О разрывных решениях уравнений “мелкой воды” над уступом дна // ПМТФ. 2002. Т. 43, № 6. С. 62–74.
3. Букреев В. И., Гусев А. В. Отражение волны прорыва от вертикальной стенки // Тр. Новосиб. гос. архит.-строит. ун-та. 2000. Т. 3, № 2. С. 47–59.
4. Барахнин В. Б., Краснощекова Т. В., Потапов И. Н. Отражение волны прорыва от вертикальной стенки. Численное моделирование и эксперимент // ПМТФ. 2001. Т. 42, № 2. С. 96–102.
5. Cooker M. J., Weidman P. D., Bale D. S. Reflection of high-amplitude solitary wave at a vertical wall // J. Fluid Mech. 1997. V. 342. P. 141–158.
6. McHugh J. P., Watt D. W. Surface waves impinging on a vertical wall // Phys. Fluids. 1998. V. 10, N 1. P. 324–326.

7. **Стокер Дж. Дж.** Волны на воде. Математическая теория и приложения. М.: Изд-во иностр. лит., 1969.
8. **Дегтярев В. В., Шаталина В. А., Букреев В. И. и др.** Экспериментальное исследование гидродинамических аспектов развития аварийных ситуаций на судоходных шлюзах // Изв. вузов. Стр-во. 2002. № 5. С. 70–75.
9. **Букреев В. И.** О корреляции между теоретическими и экспериментальными уединенными волнами // ПМТФ. 1999. Т. 40, № 3. С. 44–52.
10. **Ven Te Chow.** Open-channel hydraulics. N. Y. etc.: McGraw Hill Book Co., 1959.

*Поступила в редакцию 16/VIII 2002 г.*

---