

УДК 532.532+532.59

## ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ ПРИ ОТРАЖЕНИИ БОРА ОТ ВЕРТИКАЛЬНОЙ СТЕНКИ

В. И. Букреев

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

E-mail: bukreev@hydro.nsc.ru

Приведены результаты опытов, в которых нелинейная волна отражалась от вертикальной стенки. Показано, что гидродинамическое давление волны существенно зависит от формы ее переднего фронта. Установлено, что наиболее высокое давление имеет место при отражении волны с кумулятивной струей на переднем фронте.

Ключевые слова: бор, отражение от стенки, гидродинамическое давление, эксперимент.

Термином бор принято характеризовать движущийся гидравлический прыжок [1]. Такой вид имеют катастрофические волны различной природы, в частности волна цунами при ее выходе на шельф и волна, распространяющаяся по нижнему бьефу после разрушения плотины. Выделяют пять разновидностей бора [1]. Основные разновидности — гладкий ондулярный бор и бор с вальцом в головной части — описаны, например, в работе [2]. В процессе эволюции гладкого ондулярного бора может произойти обрушение его переднего фронта. На некоторой стадии процесса обрушения на переднем фронте образуется кумулятивная струя, в которой сосредоточивается значительная энергия. На рис. 1 приведены фотографии головной части бора с кумулятивными струями на переднем фронте. Удар кумулятивной струи по преграде сопровождается существенным ростом давления. Динамическое воздействие гладкого бора значительно слабее, а при воздействии бора с развитым обрушением переднего фронта давление снижается вследствие захвата воздуха.

В данной работе приводятся некоторые результаты экспериментов, схема которых представлена на рис. 2. В длинном закрытом по торцам прямоугольном бассейне шириной 20 см и высотой 25 см с помощью вертикального щита толщиной 1 см создавался начальный перепад глубин  $H = h_- - h_+ > 0$  покоящейся жидкости. Щит располагался на расстоянии  $L$  от левой вертикальной торцевой стенки бассейна (см. рис. 2). В данном поперечном сечении располагается начало неподвижной прямоугольной системы координат  $(x, z)$ . На участке  $(-L, x_1)$  дно канала было горизонтальным, на участке  $(x_1, x_2)$  дно повышалось по линейному закону, на участке  $(x_2, x_3)$  дно вновь становилось горизонтальным. Далее наклонный участок дна называется шельфом, горизонтальный участок  $(x_2, x_3)$  — пляжем. В конце пляжа располагалась вертикальная стенка с датчиками давления, диаметр которых равен 1 см, собственная частота — примерно 50 кГц. Спектральный анализ изучаемых процессов, проводившийся по методике, описанной в [3], показал, что датчики не вносили частотных искажений. Статическая калибровка датчиков осуществлялась непосредственно на экспериментальной установке путем изменения глубины покоящейся жидкости, когда давление на датчик определяется по гидростатическому закону. Статическая калибровочная характеристика датчика была линейной и стабильной. Среднеквад-

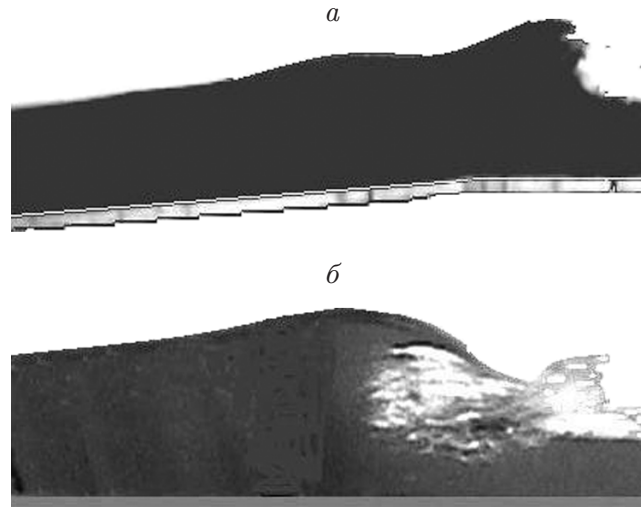


Рис. 1. Образование кумулятивных струй в процессе обрушения переднего фронта бора:

*a* — при изменении уклона дна, *б* — на горизонтальном дне

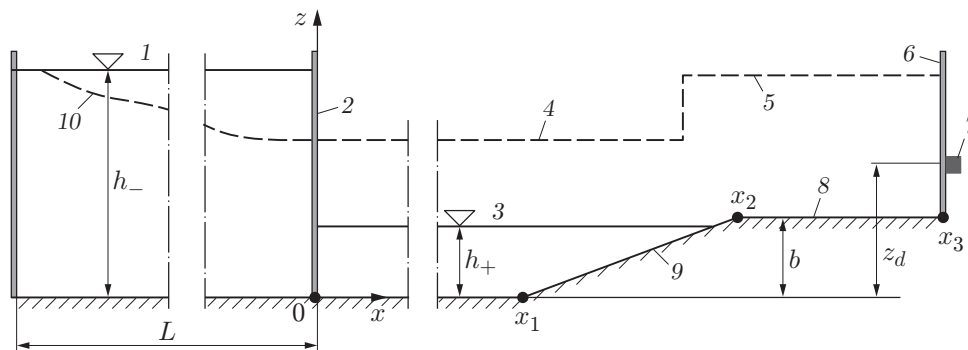


Рис. 2. Схема эксперимента:

1 — начальный уровень жидкости в верхнем бьефе, 2 — щит, 3 — начальный уровень жидкости в нижнем бьефе, 4 — уровень жидкости за прямой прерывной волной, 5 — уровень жидкости за отраженной волной, 6 — стенка, 7 — датчик давления, 8 — пляж, 9 — шельф, 10 — волна понижения уровня

ратичное значение случайной погрешности измерения давления, которая оценивалась по результатам 4–5 опытов при одних и тех же условиях, не превышало 3 %.

В момент времени  $t = 0$  щит быстро (за 0,04 с) поднимался вертикально вверх. При этом в верхний бьеф распространялась гладкая волна понижения уровня, в нижний бьеф — волна типа бора. Профили и кинематические характеристики (высота, скорость распространения и скорость движения жидкости) таких волн изучались теоретически (на основе первого приближения теории мелкой воды) и экспериментально в работе [4]. Суммарная сила, действующая на вертикальную стенку при отражении от нее бора, исследовалась в экспериментах [2, 3]. В настоящей работе рассматривается локальное давление  $p(z)$ , а не суммарная сила. Далее приводятся результаты опытов, в которых параметры  $h_- = 20,2$  см,  $L = 360$  см,  $x_1 = 180$  см,  $x_2 = 85$  см,  $x_3 = 210$  см,  $b = 6,8$  см были неизменными, менялась только глубина  $h_+$ .

В соответствии с первым приближением теории мелкой воды все разновидности реального бора заменяются прерывной волной. На фронте прерывной волны глубина, ско-

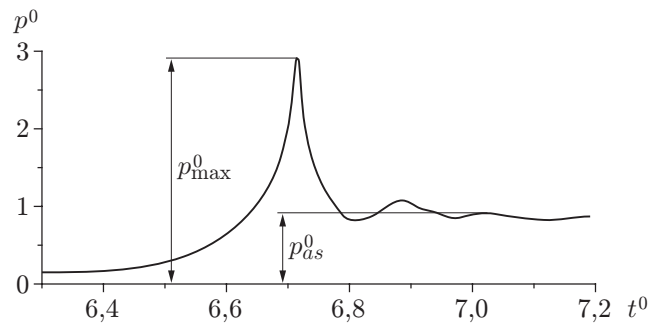
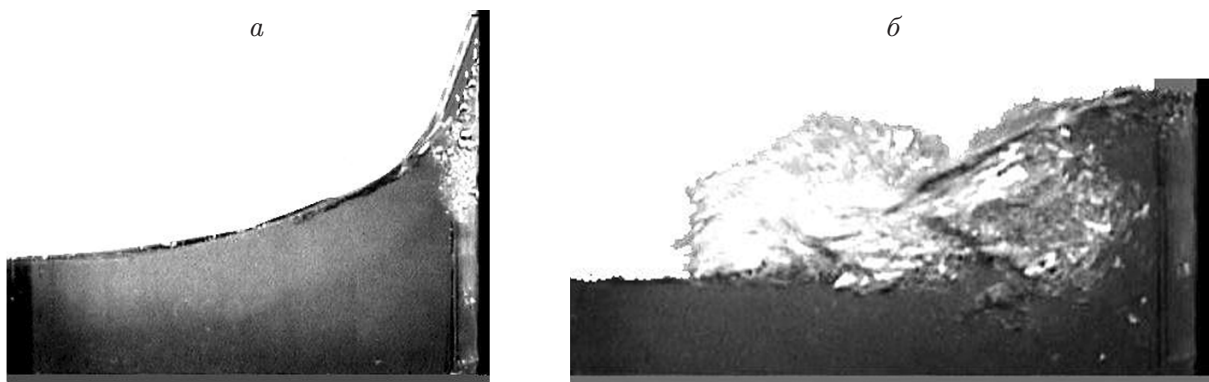
Рис. 3. Зависимость локального давления от времени при  $h_+ = 11,1$  см,  $z_d = 10$  см

Рис. 4. Начальные стадии отражения гладкого бора (а) и бора с кумулятивной струей на переднем фронте (б)

рость движения жидкости и давление меняются скачкообразно. В момент отражения такой модельной волны давление в точке установки датчика мгновенно принимает значение  $p_d = \rho g(h_0 + b - z_d)$ , где  $\rho$  — плотность жидкости;  $g$  — ускорение свободного падения;  $h_0$  — глубина над пляжем за фронтом отраженной волны; величины  $b$  и  $z_d$  показаны на рис. 2. Алгоритм расчета величины  $h_0$  приведен в работе [4]. При  $h_+/h_- > 0,1$  величина  $h_0$  незначительно отличается от величины  $h_- - b$  [3].

На рис. 3 показана экспериментально полученная зависимость давления, действующего на датчик, от времени. Видно, что сначала давление резко увеличивается, а затем выходит на постоянное значение. Безразмерное время  $t^0 = (g/h_-)^{0,5}t$  отсчитывается с момента начала подъема щита. Измеренное давление  $p_d$  нормировано на значение гидростатического давления, которое действует на датчик при его заглублении под уровень свободной поверхности на величину  $h_- - z_d$  (на рис. 3  $p^0 = p_d/[\rho g(h_- - z_d)]$ ). На рис. 3 показаны также характерные значения ударного давления  $p_{\max}^0$  и асимптотического давления  $p_{as}^0$ , информация о которых приводится ниже.

На рис. 4 приведены фотографии начальной стадии отражения реальной волны. На начальной стадии отражения имеет место кратковременный заплеск жидкости на стенку, высота которого зависит от формы переднего фронта бора [5]. При отражении гладкого бора (рис. 4,а) высота заплеска больше, чем при отражении бора с вальцом. Для этих форм переднего фронта ударное давление обусловлено заплеском жидкости. При отражении волны, находящейся на стадии обрушения переднего фронта (рис. 4,б), ударное давление обусловлено действием кумулятивной струи.

На рис. 5 приведены экспериментальные данные об асимптотическом давлении при различных значениях координаты  $z_d$ . По оси абсцисс отложена безразмерная начальная

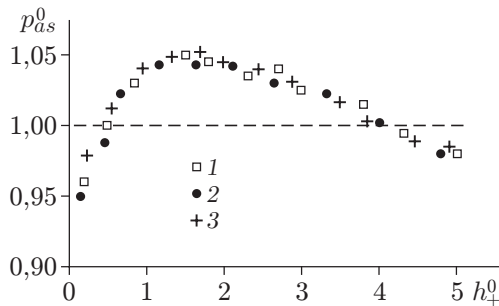


Рис. 5

Рис. 5. Зависимость асимптотического давления от начальной глубины нижнего бьефа при различных значениях координаты  $z_d$ :

1 —  $z_d = 13$  см, 2 —  $z_d = 14$  см, 3 —  $z_d = 17$  см; штриховая линия —  $p_{as}^0 = 1$

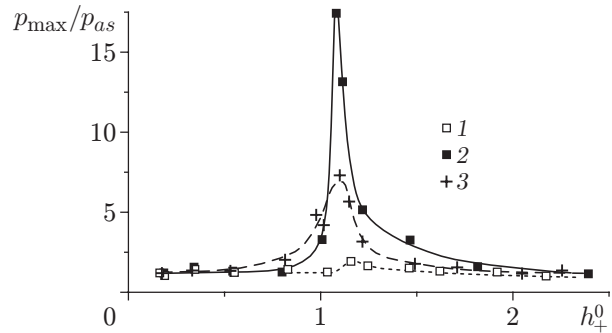


Рис. 6

Рис. 6. Зависимость отношения ударного давления к асимптотическому от начальной глубины нижнего бьефа при различных значениях координаты  $z_d$ :

1 —  $z_d = 13$  см, 2 —  $z_d = 14$  см, 3 —  $z_d = 17$  см

разность глубин верхнего и нижнего бьефов  $h_+^0 = 1 - h_+/h_- \geq 0$ . В качестве характерного линейного размера использована разность  $h_- - h_+$ , которая описывает поступающую в волны энергию, отнесенную к единице объема движущейся жидкости. На рис. 5 видно, что в рассмотренном диапазоне значений  $h_+^0$  безразмерное асимптотическое давление  $p_{as}^0$  отличается от значения  $p_{as}^0 = 1$  не более чем на 5 %. Следовательно, в указанном диапазоне асимптотическое давление можно определить по гидростатическому закону и по заглублению рассматриваемой точки под начальный уровень свободной поверхности в верхнем бьефе с погрешностью не более 5 %.

Ударное давление может значительно превышать асимптотическое. Соответствующие экспериментальные данные при различных значениях координаты  $z_d$  приведены на рис. 6. Максимумы кривых на рис. 6 соответствуют значению  $h_+^0$ , при котором на стенку набегала волна с кумулятивной струей на переднем фронте. При меньших значениях  $h_+^0$  набегавшая волна обрушивалась до подхода к стенке, а при больших значениях  $h_+^0$  набегавшая волна была гладкой. Наибольший максимум (кривая 2 на рис. 6) имеет место в случае, когда датчик находится в зоне действия кумулятивной струи. При этом ударное давление превышает асимптотическое почти в 18 раз.

На рис. 7 приведены экспериментальные данные о распределении ударного давления по вертикальной координате при различных значениях параметра  $h_+^0$ . Величина  $z^0$  на рис. 7 определяется по формуле  $z^0 = (z_d - b)/(h_- - b)$ . При  $h_+^0 = 0,65$  (кривая 1) на стенку набегала волна с уже обрушившимся передним фронтом, при  $h_+^0 = 0,41$  (кривая 2) — гладкая волна, при  $h_+^0 = 0,48$  (кривая 3) — волна с кумулятивной струей. Максимум кривой 3 соответствует удару кумулятивной струи по датчику давления при  $z^0 = 0,54$ .

Используя формулу  $u_c = (2p_{max}/\rho)^{0,5}$ , по максимальному ударному давлению кумулятивной струи можно оценить скорость движения жидкости в этой струе. В проведенных экспериментах наибольшее значение  $u_c = 4,45$  м/с. В соответствии с результатами работы [4] скорость движения жидкости в набегавшей волне равна  $u_* = 0,66$  м/с при тех же значениях заданных параметров, что и в опытах. Динамическое давление в точке торможения потока определяется формулой  $p_* = \rho u_*^2/2$ . В опытах отношение  $p_{max}/p_* = (u_c/u_*)^2$  достигало значения  $p_{max}/p_* = 45,5$ .

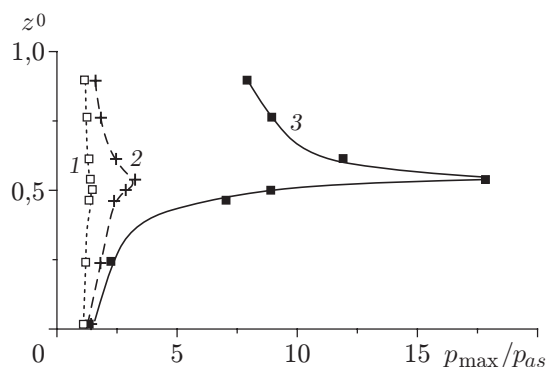


Рис. 7. Зависимость ударного давления от вертикальной координаты при различных значениях  $h_+^0$ :  
 1 —  $h_+^0 = 0,65$ , 2 —  $h_+^0 = 0,41$ , 3 —  $h_+^0 = 0,48$

В случае разрушения высокой плотины или при выходе цунами на мелководье скорость  $u_*$  может достигать 20 м/с и более. Кумулятивные струи, образующиеся при обрушении таких волн, обладают большой разрушительной силой. Однако обрушение волны цунами происходит еще на подходе к береговой линии, а при разрушении плотины волна обрушивается на расстоянии не более 100 м вниз по потоку. При этом вероятность того, что какое-либо инженерное сооружение окажется под воздействием кумулятивных струй, мала. Как правило, в этих случаях на препятствие набегают волны с уже обрушившимся передним фронтом, и динамическое давление мало отличается от асимптотического (см. работу [3] и рис. 6). Значительно опаснее кумулятивные струи, образующиеся при обрушении высоких ветровых волн. В научно-популярных фильмах приводятся картины кумулятивных струй, образующихся даже при слабом ветре на рифах, и примеры, когда при ураганном ветре волны пробивали борт корабля.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Чоу В. Т.** Гидравлика открытых каналов. М.: Стройиздат, 1969.
2. **Букреев В. И.** Зависимость силового воздействия волны на воде от формы ее переднего фронта // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2008. № 6. С. 81–88.
3. **Букреев В. И.** Силовое воздействие прерывных волн на вертикальную стенку // ПМТФ. 2009. Т. 50, № 2. С. 129–135.
4. **Букреев В. И., Гусев А. В., Остапенко В. В.** Волны в открытом канале, образующиеся при удалении щита перед неровным дном типа шельфа // Вод. ресурсы. 2004. Т. 31, № 5. С. 540–545.
5. **Букреев В. И.** Заплеск воды на вертикальную стенку при распаде разрыва над уступом // ПМТФ. 2003. Т. 44, № 1. С. 71–76.

Поступила в редакцию 2/III 2009 г.