

Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 2 — 1974

УДК 551.466.3

Г. Е. КОНОНКОВА, А. Э. РЕЙХРУДЕЛЬ, НГУЕН ТХЕ ТЬОНГ

ИЗМЕНЕНИЕ ВЫСОТ И РАЗРУШЕНИЕ ОДИНОЧНЫХ ВОЛН НА ПЛОСКОМ БЕРЕГОВОМ ОТКОСЕ

В статье представлены результаты исследования изменения высот одиночных волн и разрушения их на мелководье в зависимости от высоты h_0 заданной волны, угла откоса α , встречающего волну, глубины канала H_0 , шероховатости d и подвижности береговых отложений. Установлено, что изменение высоты волны на откосе сильно зависит от первоначально заданных условий H_0 , h_0 , $\text{ctg } \alpha$, d и не укладывается в одну степенную зависимость. Параметр разрушения волны γ также зависит от всех перечисленных величин и изменяется от 0,96 до 3,6.

Настоящая работа посвящена исследованию изменения высот одиночных волн и разрушения их на откосе в зависимости от различных факторов. Изменение высот волн в области, близкой к разрушению, и само разрушение — задача наиболее трудная для теоретического исследования. В то же время она мало изучена экспериментально [1, 2, 3, 4]. Нами проведено три серии опытов, в которых изучалось изменение высот волн на мелководье в зависимости от высоты заданной волны h_0 , угла откоса α , встречающего волну, глубину канала H_0 , шероховатости и подвижности грунта, выстилающего откос. Исследования проводились на четырех откосах ($\text{ctg } \alpha = 5, 7, 10, 15$) и при четырех глубинах канала ($H_0 = 16, 19, 22, 25$ см). Дно канала и откос были покрыты гравием диаметром $d = 0,5 - 0,7$ см. Высоты волн в различных опытах задавались от 3 до 8 см. Высота, форма и скорость продвижения волны вдоль канала фиксировались струнными волнографами В. Кузнецова [5]. В области трансформации волн на откосе производилась кино съемка киноаппаратами «Аскания» и «Конвас». Скорость съемки была около 40 кадров в секунду. Установка и механизм, с помощью которого создавалась одиночная волна, описаны в [6].

Первая серия опытов

В первой серии опытов исследовалось изменение высоты волны при подходе ее к берегу и на берегу с различными уклонами в зависимости от высоты заданной волны. Глубина воды в канале H_0 во всех случаях составляла 19 см. На рис. 1,а представлены данные, относящиеся к берегу с откосом $\text{ctg } \alpha = 5$. Начало координат соответствует точке пересечения уровня свободной невозмущенной поверхности с бе-

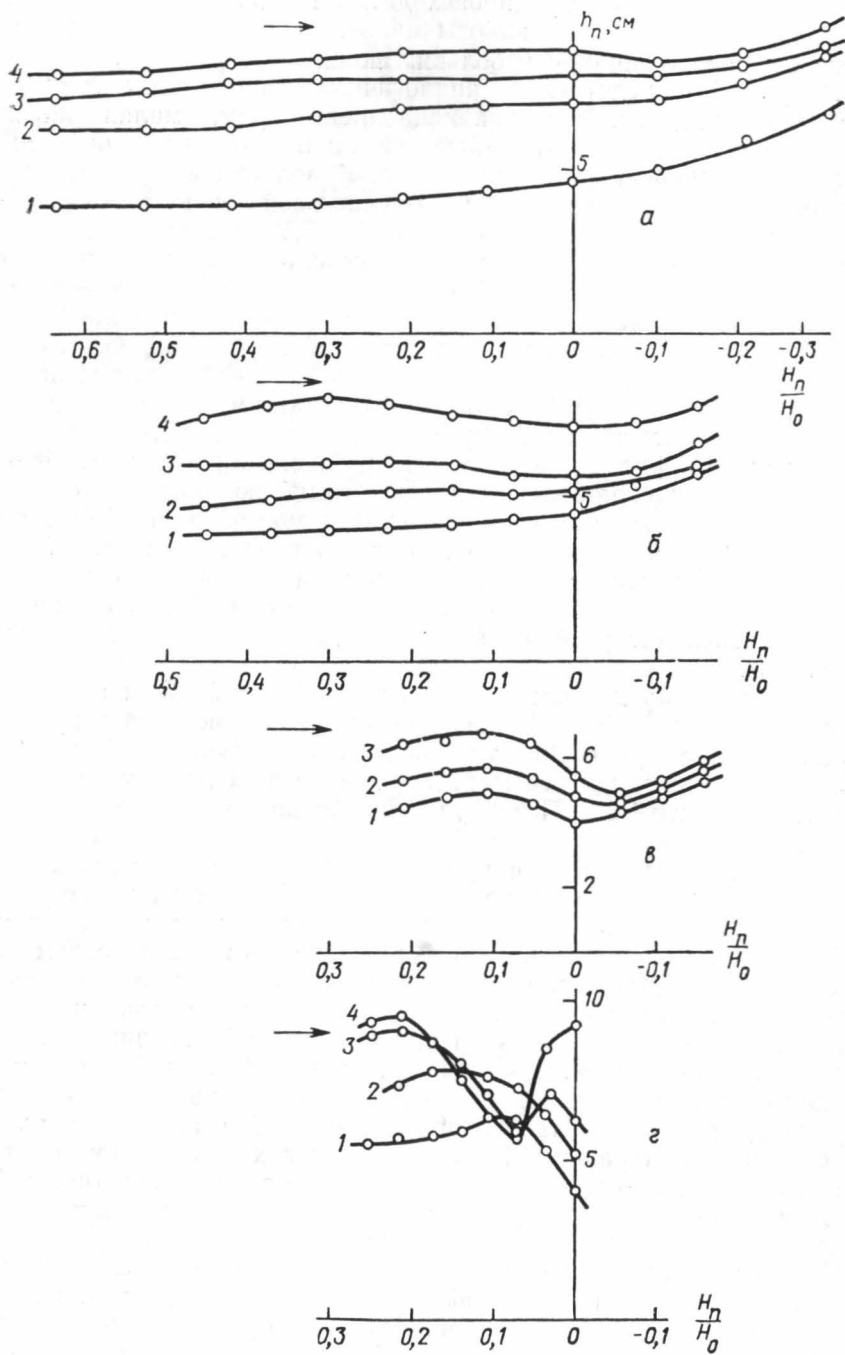


Рис. 1. Изменение высоты волны при подходе ее к берегу и на берегу для различных первоначальных h_0 ($H_0 = \text{const}$). а — $\text{ctg } \alpha = 5$: 1 — 3,5; 2 — 6,3; 3 — 7; 4 — 8; б — $\text{ctg } \alpha = 7$: 1 — 3,5; 2 — 4,5; 3 — 5,5; 4 — 7; в — $\text{ctg } \alpha = 10$: 1 — 4,2; 2 — 5,1; 3 — 6,5; г — $\text{ctg } \alpha = 15$: 1 — 4,5; 2 — 6,3; 3 — 6,9; 4 — 7,8

реговым откосом. При уменьшении относительной глубины для всех исследованных высот волн происходит плановое увеличение высоты волны. Причем увеличение высоты малых волн начинается на меньших относительных глубинах, чем больших волн.

На рис. 1,б представлена аналогичная зависимость для откоса $\text{ctg } \alpha = 7$. На этом графике, как и на предыдущем, малая начальная высота волны ($h_0 = 3,5$ см) плавно увеличивается при приближении к берегу и на берегу. Для более высокой волны ($h_0 = 4,5$ см) нарастание начинается несколько дальше от береговой черты, а вблизи берега кривая становится более полой. Для $h_0 = 5,5$ см в исследуемой области кривая идет почти горизонтально, несколько опускаясь у береговой черты. Разрушения волны в этом случае еще не наблюдается. Для $h_0 = 7$ см кривая имеет явно выраженный максимум в области относительных глубин 0,3. По кадрам кинофильма хорошо видно, что именно в этот момент, на этой относительной глубине наблюдается заворачивание гребня волны. (На всех отснятых нами фильмах наблюдалась максимальная высота на той глубине, где гребень волны начинает заворачиваться (см. рис. 2, сечение *aa*).) Затем происходило обрушение гребня и волна превращалась в поток. Это наблюдалось на тех откосах, на которых происходило разрушение исследуемой волны. Таким образом, за глубину и высоту разрушения приняты те значения H_n и h_n , которые наблюдаются в момент заворачивания гребня, что соответствует максимуму на кривой зависимости h_n от H_n/H_0 . Итак, на откосе $\text{ctg } \alpha = 7$ происходит разрушение волн достаточно большой высоты ($h_0 \geq 7$ см).

На рис. 1,в представлены зависимости h_n от H_n/H_0 на более пологих откосах ($\text{ctg } \alpha = 10$). Хорошо видно, что на всех трех кривых наблюдается максимум в области относительной глубины 0,1, т. е. происходит разрушение всех испытанных волн в довольно узкой области относительных глубин. После разрушения волновое движение превращается в поступательное.

Изменение высоты волн при продвижении их по мелководью для откоса $\text{ctg } \alpha = 15$ представлено на рис. 1,г. По кривым видно, что разрушение происходило во всех четырех случаях, причем относительная глубина, на которой происходит обрушение, изменяется с изменением h_0 (см. табл. 1). Для самой низкой из испытанных на этом откосе волн ($h_0 = 4$ см) максимум кривой находится наиболее близко к береговой черте. По мере увеличения значения h_0 точка обрушения отодвигается дальше от берега на большие относительные глубины. Это естественно, так как согласно теории одиночных волн, чем выше одиночная волна, тем она круче. Соответственно она менее устойчива, поэтому разрушение ее начинается раньше. Разрушение низких волн происходит при больших относительных высотах h_n/h_0 , чем более высоких (см. табл. 1).

Для различных h_0 (от 4 до 7,8 см) область разрушения волн наблюдается от 0,1 до 0,25 относительных глубин.

При рассмотрении кривых на рис. 1,г видно, что после максимума, соответствующего началу обрушения волны, кривая идет резко вниз, а затем в некоторых случаях происходит повторный довольно крутой подъем. Объяснение этому можно найти, проанализировав рис. 2. Картина подобна той, которая получалась у Дж. Дж. Стокера [7] при расчете разрушения волн на мелкой воде (приближение первого порядка). Такой тип обрушения [8] назван ныряющим (*plunging*). Заостренный гребень разрушающейся волны ударяется о берег или слой воды, находившийся до того момента в покое, и иногда возникает подобие коммулятивной струи. За счет этого и происходит резкий подъем

Таблица 1

Серия 1

ctg $\alpha=7$						ctg $\alpha=10$						ctg $\alpha=15$					
h_0	h_p	H_p	h_p/h_0	H_p/H_0	γ	h_0	h_p	H_p	h_p/h_0	H_p/H_0	γ	h_0	h_p	H_p	h_p/h_0	H_p/H_0	γ
7,0	7,84	4,94	1,12	0,262	1,59	4,2	4,75	2,09	1,13	0,11	1,92	4,0	5,32	1,90	1,35	0,10	2,80
—	—	—	—	—	—	5,1	5,60	2,09	1,10	0,11	2,68	6,3	8,13	2,28	1,29	0,12	3,56
—	—	—	—	—	—	6,8	7,00	2,28	1,03	0,12	3,07	6,9	8,40	3,23	1,22	0,17	2,60
												7,8	9,66	4,75	1,24	0,25	2,04

Таблица 2

Серия 2

ctg $\alpha=7$						ctg $\alpha=10$						ctg $\alpha=15$					
h_0	h_p	H_p	h_p/h_0	H_p/H_0	γ	h_0	h_p	H_p	h_p/h_0	H_p/H_0	γ	h_0	h_p	H_p	h_p/h_0	H_p/H_0	γ
6,1	6,7	4,18	1,1	0,22	1,6	5,9	6,6	2,09	1,12	0,11	3,16	6,2	7,94	3,8	1,28	0,2	2,09

Таблица 3

Серия 3

ctg $\alpha=10$							ctg $\alpha=15$						
H_0	h_0	h_p	H_p	h_p/h_0	H_p/H_0	γ	H_0	h_0	h_p	H_p	h_p/h_0	H_p/H_0	γ
22,0	5,2	6,35	0,66	1,22	0,03	0,963	25,6	5,2	8,2	2,30	1,58	0,09	3,57
19,0	5,9	6,68	3,04	1,13	0,16	2,20	22,0	5,3	7,16	3,66	1,35	0,18	1,81
16,0	6,5	6,83	3,20	1,05	0,20	2,14	19,0	6,5	8,55	4,00	1,32	0,21	2,14
							16,0	7,0	8,55	3,68	1,22	0,23	2,32

уровня. Иногда после обрушения просто образуется бурный сильно аэрированный поток, точные границы которого трудно проследить.

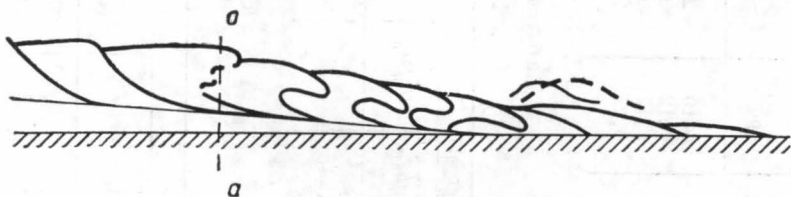


Рис. 2. Трансформация волны на откосе $\text{ctg } \alpha = 15$. Время между двумя последующими положениями волны $\Delta t = 0,5 \text{ сек}$

Именно поэтому в область отрицательных относительных глубин (берег) кривые на рис. 1, 2 не продолжены.

Вторая серия опытов

Рассмотрим изменение высоты волны на откосе в зависимости от длины и угла откоса, на который она набегаёт. На рис. 3 представлено изменение относительных высот волн h_n/h_0 при продвижении к берегу и на берегу. Исследовалась волна высотой $6 \pm 0,2 \text{ см}$ при глубине воды в канале $H_0 = 19 \text{ см}$.

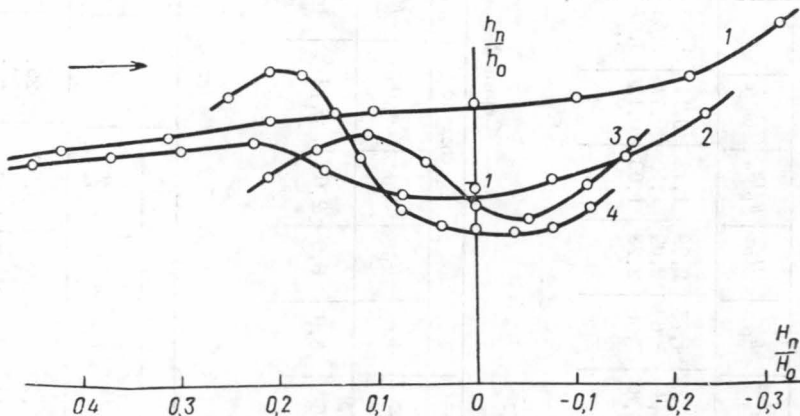


Рис. 3. Изменение относительной высоты волны при подходе ее к берегу и на берегу для различных уклонов берега ($H_0 = \text{const}$, $h_0 = \text{const}$):
1 — 5; 2 — 7; 3 — 10; 4 — 15

При сопоставлении кривых видно, что если кривая 1, соответствующая откосу с $\text{ctg } \alpha = 5$, плавно поднимается вверх, то кривые 2 ($\text{ctg } \alpha = 7$), 3 ($\text{ctg } \alpha = 10$) и 4 ($\text{ctg } \alpha = 15$) имеют максимум на различных относительных глубинах. Чем положе откос, тем на большей относительной глубине происходит разрушение волны. Исключение составляет откос с $\text{ctg } \alpha = 7$ (кривая 2). Объясняется это тем, что поверхность откосов с $\text{ctg } \alpha = 10$ и 15 была покрыта закрепленной шероховатостью (гравием), а на откосе $\text{ctg } \alpha = 7$ гравий, выстилающий откос, был не закреплен. Таким образом, часть энергии волны терялась на перенос частиц гравия, скорее происходило затормаживание подошвы волны, волна перестраивалась, искажалась, и разрушение наступало раньше.

На графике видно также, что на более пологих откосах разрушение наступает при больших относительных высотах волн (за исключением откоса с $\text{ctg } \alpha = 7$), чем на более крутых (см. табл. 2).

Теоретические работы, исследующие изменение высот волн при приближении их к берегу, не учитывают влияния шероховатости на изменение высот волн. В них обычно получается степенная зависимость $h_n/h_0 = (H_0/H_n)^n$. У Эри и Грина $n=0,25$ (рис. 4), данные [9] соответствуют этой степени. По результатам работ [4] и [10] $n=1$, в [1] $n=4/3$. Экспериментальные данные довольно сильно отличаются от большинства теоретических предсказаний, особенно в области, близкой к разрушению волн. В экспериментальной работе [2] получились различные степени для различных уклонов берега:

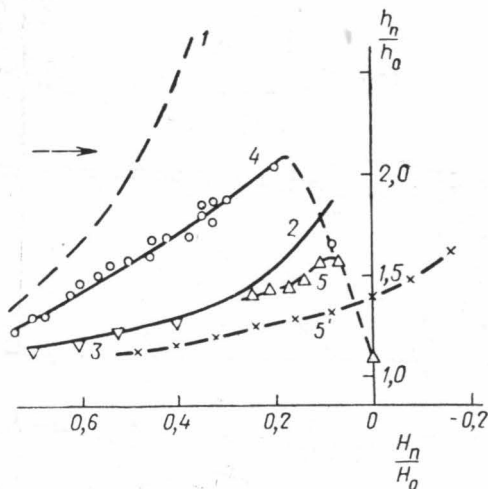


Рис. 4. Сопоставление кривых h_n/h_0 от H_n/H_0 по данным различных авторов: 1 — $n=1$, $\text{ctg } \alpha=10,0$, по данным Crimshaw; 2 — $n=0,25$, по данным Эри и Грина; 3 — $n=0,25$, $\text{ctg } \alpha=20$, по данным Peregren; 4 — $\text{ctg } \alpha=19$, по данным Григораш; 5 — $\text{ctg } \alpha=15$ и 5' — $\text{ctg } \alpha=5$, по нашим данным

$$n = 0,49, \quad \text{ctg } \alpha = 43,5,$$

$$n = 0,26, \quad \text{ctg } \alpha = 20,0,$$

$$n = 0,19, \quad \text{ctg } \alpha = 15,4.$$

Наиболее близка к экспериментальным кривая Эри — Грина. При сравнении кривых на рис. 4 видно, что степень возрастания высоты волны при продвижении по мелководью зависит от крутизны откоса. Результаты работы [2] подтверждают, что поведение волн на различных откосах не укладывается в одну степенную зависимость: степень возрастания высоты волны вблизи области разрушения тем больше, чем положе откос.

Кривые, полученные авторами данной работы, ложатся ниже всех остальных. Это объясняется тем, что откосы, на которых производилось исследование набегания волн, были покрыты гравием. Характерный размер гравия d составлял около 0,04 глубин воды H_0 . В перечисленных выше теоретических работах шероховатость дна не учитывалась, эксперименты в [2, 3] производились на гладких откосах.

Третья серия опытов

Третья серия опытов посвящена исследованию трансформации одиночной волны при продвижении ее по мелководью в зависимости от первоначальной глубины канала H_0 . Рассматривались четыре глубины канала: $H_0=16, 19, 22, 25$ см. По теории одиночных волн и данным опыта при одних и тех же условиях возбуждения на большей глубине возникают более длинные и более низкие волны, чем в канале малой глубины. В [3] получен противоположный эффект, по-видимому, разница заключается в условиях постановки опытов. График зависимости

высоты создаваемой волны от глубины канала представлен на рис. 5,а. Чтобы исключить влияние начальной высоты волны, мы рассматривали изменение относительной высоты волны h_n/h_0 , т. е. изменение высоты единичной волны, при различных H_0 .

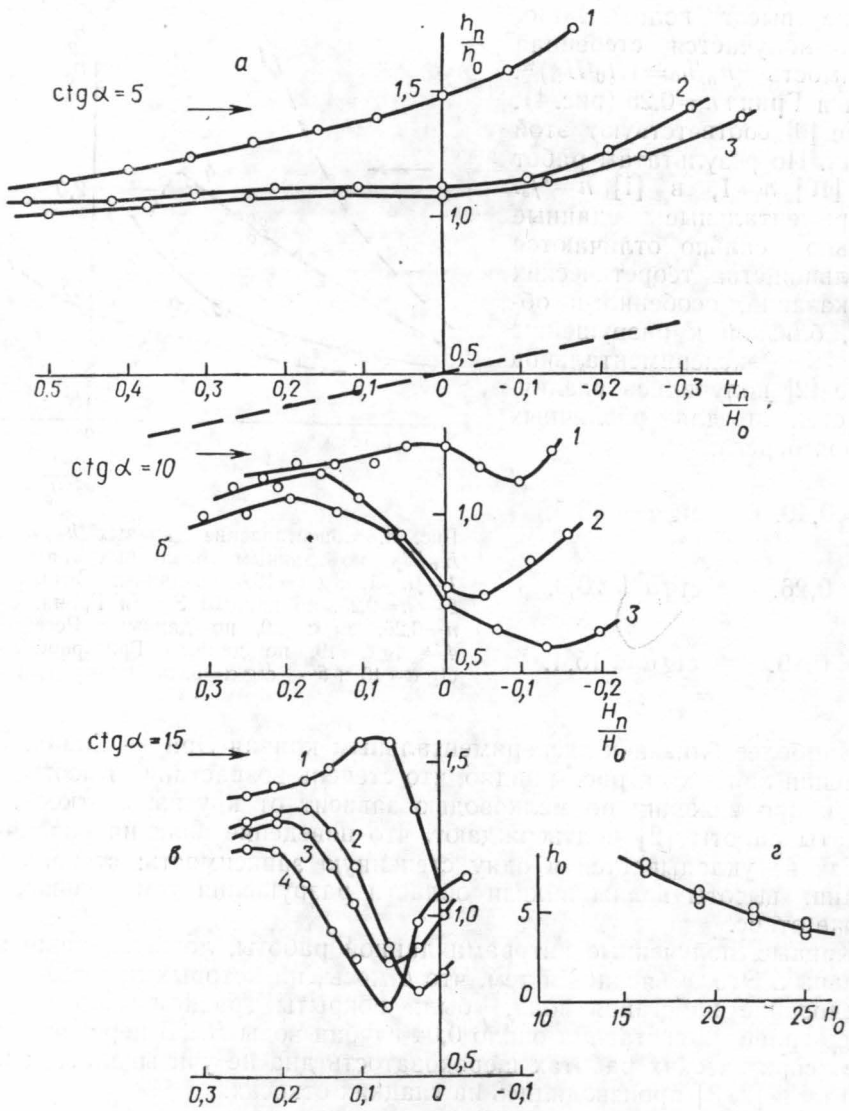


Рис. 5. Изменение относительной высоты волны на откосе для различных начальных H_0 . а: 1—25, 2—19, 3—16; б: 1—22, 2—19, 3—16; в: 1—25,6, 2—22, 3—19; 4—16; г—зависимость h_0 от H_0

На рис. 5,а представлены кривые зависимости h_n/h_0 от H_n/H_0 для различных первоначальных глубин канала для откоса $ctg \alpha = 5$. Кривые, соответствующие большему первоначальному глубинам, расположены выше кривых, соответствующих меньшим глубинам. Кривая 1 идет круче кривых 2 и 3. Если рассматривать кривую 1 относительно линии откоса (пунктирная линия на рис. 5,а), то видно, что они идут почти

параллельно. Это означает, что максимальная толщина слоя воды остается постоянной на протяжении всего откоса до береговой черты, в то время как для малых глубин канала $H_0=16$ и 19 см (кривые 1 и 2) наблюдается уменьшение толщины слоя. По-видимому, это происходит в результате (наблюдаемого по кинофильмам) более сильного искажения формы волны.

На откосе $\text{ctg } \alpha=10$ (рис. 5,б) наблюдается разрушение волн при всех исследованных глубинах. Однако разрушение происходит на различных относительных глубинах. При глубине канала $H_0=22$ см разрушение волны происходит вблизи береговой черты, на относительной глубине $H_n/H_0=0,03$.

При глубине 19 см — в области $H_n/H_0=0,16$, при $H_0=16$ см — на $H_n/H_0=0,20$ (табл. 3), т. е. при увеличении глубины канала, точка обрушения волны приближается к береговой черте. То же самое происходит и на откосе с $\text{ctg } \alpha=15$ (см. рис. 5,в) с той разницей, что разрушение происходит на больших относительных глубинах, чем на откосе с $\text{ctg } \alpha=10$ (см. табл. 2).

Таким образом, при исследовании условий разрушения волн нами установлено, что высота разбивающегося вала и глубина, на которой происходит обрушение, в большой степени зависят от первоначально заданных условий: высоты волны, глубины воды, угла откоса, на котором происходит разрушение, подвижности береговых отложений. В наших опытах значения относительных глубин H_p/H_0 , на которых происходило разрушение волн, находились в области от 0 до 0,3, значения относительных высот волн h_p/h_0 — от 1,03 до 1,58. Условия разрушения волн могут также характеризоваться отношением высоты волны h_p , в момент разрушения к соответствующей глубине воды H_p . Диапазон значений $\gamma=h_p/H_p$, при которых возможно разрушение, очень велик. В наших опытах γ изменяется от 0,96 до 3,6 (см. табл. 1).

Сравним полученные нами результаты с результатами Мак Коуэна [11] для разбивающегося вала в канале постоянного сечения. Согласно его данным, волна разбивается, когда $\gamma=0,78$. Эта величина для волны прибоем мала. В решении для одиночной волны на переменной глубине в [4] показано, что разрушение волны происходит при $\gamma=2$. В [2] экспериментально показано, что для уклона берега с $\text{ctg } \alpha=43,5$ значение $\gamma=1,2$. В [3] $\text{ctg } \alpha=19$ получена величина $\gamma=2,4$. В работе [1] приведены результаты лабораторных и натуральных исследований ветровых волн и зыби. По лабораторным измерениям получены величины $\gamma=0,68—1,19$, по натурным — $\gamma=0,52—1,28$.

Разброс данных различных авторов объясняется, вероятно, различиями в условиях опытов и основных параметров (h_0 , H_0 , d/H_0 , $\text{ctg } \alpha$), определяющих рассматриваемый процесс. Наши опыты показали влияние каждого из этих параметров на разрушение волны. Величины γ , приведенные перечисленными авторами, укладываются в диапазон значений, полученных в данной работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Munk W. H. Сб. «Основы предсказания ветровых волн, зыби и прибоев». М., 1951.
2. Ирреп, Kulin. MJT Hydrodynamics. Laboratory Tech. Report, No. 15, 1955.
3. Григораш З. К. Опытное исследование уединенной волны в канале переменного сечения. Тр. МГИ, т. 5, 1955.
4. Grimshaw R. J. Fluid Mech., 42, 3, 1970.
5. Кононкова Г. Е., Кузнецов В. В. «Вестн. Моск. ун-та», физ., астрон., 12, № 3, 1971.

6. Михайлова Н. А., Рейхрудель А. Э. «Гидротехническое строительство», № 11, 1970.
7. Стокер Дж. Дж. Волны на воде. М., 1959.
8. Cyril I. Gavin. J. Geophys. Res. 73, No. 12, 1968.
9. Peregrin. J. Fluid Mech., 27, 4, 1967.
10. Островский Л. А., Пелиновский Е. Н. «Физика атмосферы и океана», 6, № 9, 1970.
11. Cowan Mc. Phil. Mag., 38, 351—358, 1894.

Поступила в редакцию
12.4 1972 г.

Кафедра
физики моря и вод суши