

Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 2 — 1973

УДК 551.465

С. В. ДОБРОКЛОНСКИЙ, Н. В. КОНТОБОЙЦЕВА, Л. В. ХУДОВЕКОВА

ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВОЙ СКОРОСТИ МОНОХРОМАТИЧЕСКИХ ВОЛН МАЛОЙ И БОЛЬШОЙ КРУТИЗНЫ

Проведены лабораторные измерения фазовой скорости монохроматических волн малой и большой крутизны. Экспериментальные значения фазовой скорости сопоставлены с теоретическими значениями, вычисленными по формулам Стокса и Некрасова. Наилучшее совпадение результатов (в пределах ошибки измерения) обнаруживается при проверке формулы Стокса (первое приближение), совпадающей с формулой для фазовой скорости по теории волн бесконечно малой амплитуды.

В последнее время изучению кинематики волн уделяется все большее внимание [1, 2, 3], однако по исследованию фазовой скорости волн экспериментальных данных еще очень мало и они относятся в основном к волнам малой крутизны [3, 4]. Фазовая скорость волн — это важнейшая характеристика волнового потока, и знание ее величины необходимо в исследованиях одной из основных составляющих баланса энергии волн — потока волновой энергии, в изучении взаимодействия атмосферы и океана, при решении ряда практических задач технической физики моря.

Экспериментальное исследование фазовой скорости волн в данной работе проводилось в довольно широком диапазоне изменения элементов волн монохроматического типа малой и большой крутизны. Высота волны менялась от 2,8 до 15 см, длина — от 0,77 до 3 м, крутизна волны — от 0,010 до 0,130. Волны генерировались щитовым волнопродуктором в прямолинейном волновом канале Гидрофизической лаборатории МГУ. Длина этого канала 25 м, ширина 1,23 м, высота 2,5 м. В наших опытах глубина воды была 76 см, 62 и 63 см. Волногасителем служила наклонная плоскость, расположенная под углом 15° к поверхности воды.

Измерение параметров волн проводилось с помощью струнного волнографа и методом кино съемки.

В основу струнного волнографа взята схема, предложенная ранее в работе [5]. Но в данном случае улучшена стабильность прибора, уменьшена инерция всей схемы, что достигалось заменой LC-фильтра на RC-фильтр; значительно уменьшен вес прибора. Питание схемы осуществлялось от генератора ГЗ-1 с частотой питающего напряжения 15 кГц. Во время измерений использовались две схемы с самостоятель-

ным питанием каждой из них, что осуществлялось при помощи развзвывающего трансформатора. Для выпрямления сигнала служил двухполупериодный выпрямитель, собранный по мостовой схеме на полупроводниковых диодах Д-226. Для фильтрации несущей частоты использовался низкочастотный фильтр, состоящий из элементов R_1 , C_1 ($R_1=270$ ом, $C_1=0,5$ мкф). Батарея B_1 с переменным сопротивлением служила для перемещения зайчика по шкале осциллографа. В регистрирующем приборе шлейфовом осциллографе ОМС-1 чувствительность шлейфов составляла 10^{-7} , 10^{-6} а/мм.

Датчиком волнографа служили две струны из константановой проволоки каждая длиной 20 см, диаметром 0,3 мм. Струны укреплялись на расстоянии 30 мм друг от друга в жесткой рамке из диэлектрического материала.

С датчика поступал сигнал (f), представляющий собой синусоиду частотой 15 кгц, модулированную по амплитуде сигналом с частотой порядка 1 гц, связанным с изучаемым волновым процессом. При помощи моста Д1—Д4 сигнал выпрямлялся, далее при помощи фильтров R_1 и C_1 отфильтровывалась несущая частота; в результате чего на осциллограмме записывалась только огибающая, которая и представляла собой форму взволнованной поверхности.

Статическая характеристика волнографа в рабочем участке изменения высот волн от $h=1$ см до $h=8,0$ см достаточно линейна.

Из динамической характеристики этого волнографа для волн с периодами $T=0,8$ и 1,7 сек при одинаковой глубине погружения ($l=10$ см) следует, что в рабочем диапазоне изменения периодов волн нет занижения высот волн для малых периодов.

С помощью двух таких струнных волнографов, расположенных на расстоянии 104 см друг от друга, получены записи волн на осциллограф ОМС-1. Одновременно с записью профиля волн на осциллограф производилась киносъемка волн кинокамерой «Конвас-автомат». Киноаппарат устанавливался на расстоянии 1,4 м от смотрового окна гидроканала. Оптическая ось объектива совпадала с линией уровня спокойной воды. Для определения масштаба при обработке кинолент на стекле смотрового окна была нанесена измерительная сетка — горизонтальные и вертикальные линии, прочерченные на расстоянии 4 см друг от друга.

На осциллографных записях имеет место сдвиг между максимумами профилей волн, полученных в двух точках, отстоящих друг от друга на расстоянии, меньшем длины волны. По величине этого сдвига и по расстоянию между датчиками определялась фазовая скорость волн. Фазовую скорость определяли также и по кинокадрам, для этого измерялось смещение гребня за определенный промежуток времени. Высоты волн определялись по осциллографным записям и по тем же данным киносъемки. Погрешность при измерении высот волн обоими методами составляла 4%. Погрешность измерения фазовой скорости волн при обработке кинолент и по осциллограммам составляла также 4%.

С помощью описанной выше аппаратуры получены экспериментальные данные для четырнадцати режимов волн малой крутизны и для девяти режимов волн большой крутизны. Проведено экспериментальное исследование фазовой скорости для условий «глубокой» и «мелкой» воды.

Полученные экспериментальные данные сопоставлялись с рассчитанными по нескольким теоретическим формулам. Фазовая скорость волн рассчитывалась по формулам Стокса:

$$C_0 = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \operatorname{th} kH} \text{ — первое приближение,} \quad (1)$$

$$C_3 = C_0 \left[1 + \left(\frac{\pi h}{\lambda} \right)^2 \frac{2 \operatorname{ch}^2 2kH + 2 \operatorname{ch} 2kH + 5}{8 \operatorname{sh}^4 kH} \right]^{1/2} \text{ — третье приближение;} \quad (2)$$

в случае конечной глубины и в случае бесконечно глубокой воды [6]:

$$C_3^* = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \left(1 + \frac{\pi^2 h^2}{\lambda^2} \right)}; \quad (3)$$

и по формулам Некрасова:

$$C_H = C_0 e^{3\pi h/2\lambda c \operatorname{th} kH} \text{ (для случая мелкой воды)} \quad (4)$$

и

$$C_H^* = C_0 \left(1 + \frac{3\pi h}{2\lambda} \right) \text{ (для случая глубокой воды)} \quad (5)$$

Таблица 1

Результаты эксперимента						Теоретические расчеты			Сравнение теории и эксперимента			Средние значения		
λ , см	h , см	δ	T , сек	H , см	C , см/сек	C_0 , см/сек	C_H , см/сек	C_H^* , см/сек	$\frac{C_0}{C}$	$\frac{C_H}{C}$	$\frac{C_H^*}{C}$	$\left(\frac{C_0}{C}\right)_{\text{ср}}$	$\left(\frac{C_H}{C}\right)_{\text{ср}}$	$\left(\frac{C_H^*}{C}\right)_{\text{ср}}$
125	8,6	0,069	0,96	63	130	140	193	186	1,077	1,485	1,430			
129	5,4	0,42	0,95	62	136	142	173	170	1,043	1,271	1,250			
131	5,4	0,41	0,94	63	140	143	173	171	1,022	1,235	1,221			
140	3,3	0,24	0,96	62	146	148	165	165	1,013	1,130	1,130			
153	5,1	0,33	1,06	62	144	154	181	178	1,070	1,257	1,236			
171	3,8	0,22	1,06	62	162	162	177	179	1,000	1,093	1,105			
174	3,1	0,18	1,05	62	166	163	178	177	0,934	1,073	1,066			
202	8,7	0,43	1,13	63	179	174	215	210	0,973	1,200	1,173			
208	7,7	0,37	1,21	62	172	176	211	207	1,022	1,228	1,203			
226	6,6	0,29	1,12	63	202	183	213	208	0,897	1,054	1,030			
247	5,2	0,21	1,24	62	199	188	207	206	0,945	1,040	1,035			
284	2,8	0,10	1,24	62	229	198	208	207	0,880	0,909	0,904			
293	3,8	0,13	1,24	62	236	200	214	212	0,848	0,907	0,898			
323	3,7	0,11	1,39	62	232	204	216	215	0,897	0,932	0,927			
												0,973	1,130	1,115

Таблица 2

Результаты эксперимента						Теоретические расчеты			Сравнение теории и эксперимента			Средние значения		
λ , см	h , см	δ	T , сек	H , см	C , см/сек	C_0 , см/сек	C_3 , см/сек	C_3^* , см/сек	$\frac{C_0}{C}$	$\frac{C_3}{C}$	$\frac{C_3^*}{C}$	$\left(\frac{C_0}{C}\right)_{\text{ср}}$	$\left(\frac{C_3}{C}\right)_{\text{ср}}$	$\left(\frac{C_3^*}{C}\right)_{\text{ср}}$
78	10,1	0,130	0,80	76	97	110	110	118	1,134	1,134	1,216			
88	11,0	0,125	0,80	76	110	117	126	125	1,064	1,145	1,136			
93	7,5	0,081	0,80	76	116	121	124	123	1,043	1,069	1,060			
99	10,6	0,107	0,80	76	124	125	131	131	1,008	1,056	1,056			
104	10,6	0,102	0,80	76	130	130	136	136	1,000	1,046	1,046			
113	12,9	0,114	0,80	76	141	133	141	141	0,943	1,000	1,000			
116	15,0	0,129	1,08	76	107	134	144	144	1,252	1,346	1,346			
133	11,0	0,083	0,80	76	166	144	149	148	0,867	0,897	0,892			
136	14,8	0,109	1,00	76	136	146	154	153	1,074	1,132	1,125			
												1,043	1,092	1,097

Результаты эксперимента приведены в табл. 1 и 2, где дано сравнение теоретических и экспериментальных данных для волн малой крутизны ($\delta=0,01-0,07$) и для волн большой крутизны ($\delta=0,08-0,130$).

В таблицах дано сравнение для волн малой крутизны экспериментальных значений фазовой скорости, рассчитанных по формулам Стокса и Некрасова при конечной глубине воды. В табл. 2 приведены результаты расчета по формулам Стокса: C_0 — первое приближение Стокса, C_3 — третье приближение Стокса, C_3^* — третье приближение Стокса в случае бесконечно глубокой воды; C — экспериментальные значения фазовой скорости; C_0/C , C_3/C и C_3^*/C отношения теоретических значений фазовой скорости, вычисленных по формулам Стокса, к экспериментальным. Приведены также средние значения этих отношений $(C_0/C)_{cp}$; λ — длина, h — высота, T — период, λ — крутизна волны и H — глубина воды в канале.

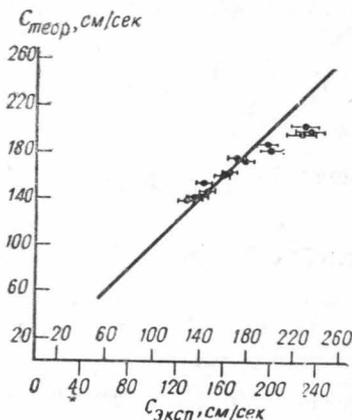


Рис. 1. Сравнение экспериментальных данных с рассчитанными по формуле (1)

ставлены экспериментальные значения и рассчитанные по формулам Некрасова.

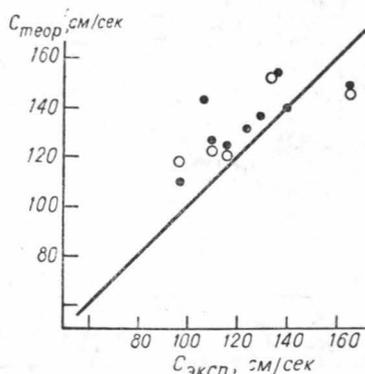


Рис. 2. Сравнение экспериментальных данных с рассчитанными по формуле (2) — заливные кружки и по формуле (3) — пустые кружки

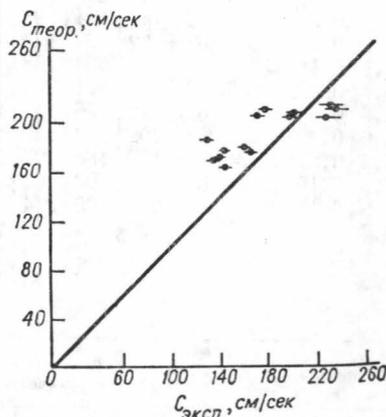


Рис. 3. Сравнение экспериментальных данных с рассчитанными по формуле (5)

Анализ полученного экспериментального материала показывает, что для волн малой крутизны (0,01—0,07) расхождение экспериментальных результатов с формулой Стокса (1) составляло 2,7%, что находится в пределах ошибки измерений (2—4%); при этом средняя величина отношения $(C_0/C_{эксп}) < 1$.

Величина фазовых скоростей волн, рассчитанных по формуле Некрасова (4), отличается от экспериментальных данных на 13%, что значительно больше ошибки эксперимента, причем $(CH/C)_{\text{ср}} > 1$, а расхождение с формулой (5) составляло 11% и отношение $(C_H^*/C)_{\text{ср}} > 1$.

Для волн большой крутизны (0,08—0,13) расхождение экспериментальных результатов с теоретическими при проверке формулы Стокса (1) составляло 4%, а отношение $(C_0/C)_{\text{ср}} > 1$. При проверке формул (2) и (3) расхождение составляло 9—10% и $(C_3/C)_{\text{ср}}$ и $(C_3^*/C)_{\text{ср}} > 1$. Следует отметить, что для волн малой крутизны 0,02—0,07 в исследованиях, проведенных в прямолинейных каналах и в штормовом бассейне, тоже обнаруживается более точное совпадение эксперимента с данными расчета по формуле Стокса (1) [3, 4, 7]; а в работе [7] получен аналогичный результат при сравнении измеренных значений фазовой скорости волн и вычисленных по формуле (1), если учесть поправку на скорость ветрового дрейфа.

Из анализа наших экспериментальных данных для волн монохроматического типа малой и большой крутизны (0,01—0,13) наблюдается наилучшее совпадение (в пределах ошибки измерения) экспериментальных результатов с теоретическими при проверке формулы (1).

ЛИТЕРАТУРА

1. Халфин И. Ш. «Океанология», 7, вып. 2, 1967.
2. Шулейкин В. В. Теория морских волн. «Труды Морского гидрофизического института», т. 9, 1956.
3. Шуляк Б. А. «Океанология», 9, вып. 4, 1969.
4. Peter S., Eaglson. «Trans. Amer. Geophys. Union», 37, No. 5, 1956.
5. Андрейчук И. Я., Генина Э. А. О работе электродных волнографов. Изв. Всесоюзного научно-исслед. ин-та гидротехники им. Б. Е. Веденеева, т. 59, 1958.
6. Сретенский Л. Н. Теория волнового движения жидкости. ОНТИ, 1936.
7. Некрасов А. И. Точная теория волн установившегося вида на поверхности тяжелой жидкости. М., Изд-во АН СССР, 1960.
8. Hidy G. M., Plate E. J. «J. Fluid. Mech.», 26, No. 4, 1966.
9. Stokes G. «Trans. Cambridge Phil. Soc.», 8, 1880, 1966.

Поступила в редакцию
7.5 1971 г.

Кафедра
физики моря