

ФИЗИКА ЗЕМЛИ, АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

Увеличение глубины проникновения волновых колебаний в толщу воды при усилении волн ветромО. Н. Мельникова^a, К. В. Показеев^b*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики моря и вод суши. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.**E-mail: ^aolamel@yandex.ru, ^bsea@phys.msu.ru*

Статья поступила 27.01.2010, подписана в печать 02.04.2010

Экспериментально исследовано проникновение нелинейных ветровых волн в глубину жидкости в лабораторном канале. Найдено, что амплитуда нелинейных волн на глубокой воде определяется только крутизной волны на глубине, нормированной на длину волны. Предлагается выражение, связывающее рост массы волн с величиной крутизны волны.

Ключевые слова: усиление ветровых волн, глубина проникновения волн, нелинейные волны.

УДК: 551.465:556.536. PACS: 92.10.hb.

Введение

На начальной стадии генерации волн горизонтальным потоком воздуха на поверхности воды возникают плоские волны. Пока скорость воздушного потока выше фазовой скорости волн $u > c$, амплитуда, длина и фазовая скорость волн растут. Усиление волн обусловлено неравномерным распределением давления воздуха вдоль волны. Начиная с Кельвина (Джеффрис, Шулейкин) этот эффект связывают с образованием вихрей на подветренном склоне волны. В [1] экспериментально обнаружен регулярный отрыв больших вихрей (размером порядка амплитуды волны) при отрыве пограничного слоя воздуха на переднем (подветренном) склоне волны, близкой к опрокидыванию. В работе [2] экспериментально показано, что на подветренном склоне волны происходит периодическая остановка вязкого слоя воздуха за счет силы трения на нижней границе слоя и обратного градиента давления на его верхней границе. При этом формируются вихри, покидающие придонный слой после его остановки. В работе [3] с помощью интеграла Коши–Лагранжа рассчитано распределение давления вдоль волны с учетом вертикального сдвига скорости и возмущений, создаваемых вихрями и периодическим торможением вязкого слоя. Рассчитанная скорость роста амплитуды линейной волны оказалась близкой экспериментальному значению. Для нелинейных волн расчеты не выполнялись. В работе [4] показано, что вихри, образующиеся у поверхности воды, притягивают к себе полосу поверхности воды шириной, близкой двум диаметрам вихря за время $\tau = \frac{\sqrt{D}}{\sqrt{g}}$, где D — расстояние между вихрем и водой, g — ускорение силы тяжести. В работе [5] экспериментально доказано, что вихри, формирующиеся в вязком слое тормозящегося в направлении движения потока воздуха над передним склоном волны, деформируют ее профиль. В результате такой деформации растут амплитуда волны, ее длина и крутизна. Крутизна волны на глубокой воде быстро достигает предельного значения (0.31–0.32), при котором наблюдается распад на трехмерные вол-

ны большей длины. Возникает вопрос: как меняется глубина проникновения колебаний нелинейных волн с ростом крутизны волны? Без ответа на этот вопрос нельзя построить метод прогноза ветрового волнения, определить энергию ветра, передаваемую волнам.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование роста массы поверхностной волны в процессе ее усиления ветром на глубокой воде.

1. Волновые колебания на поверхности воды

Эксперименты проводились в прозрачном канале длиной 3.5 м, высотой 40 см, шириной 20 см. Высота воздушного канала над водой — 10 см. Исследование выполнялось с помощью видеозаписи процесса и анемометров: вертушки и термосопротивления. Доверительный интервал измерений скорости воздуха (в диапазоне $5 < u < 6$ см/с) в области максимальной дисперсии для вероятности 0.67 составлял 0.1 см/с.

На рис. 1 приведен кадр, показывающий поверхность воды в зоне генерации волн. На начальном участке крутизна плоских волн растет, достигает критического значения $ak = 0.31$ (a — амплитуда волны, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, λ — длина волны), и на поверхности возникают трехмерные волны большей длины. Параметры волн представлены на графике в верхней части рис. 1, при распаде выполняется условие фазового синхронизма: $k_1 = k_2 + k_3$, где волна длиной 1.4 см распадается на волны 2.4 и 3.3 см, которые и видны на снимке на участке $13.5 \text{ см} < x < 17 \text{ см}$, так как фазовые скорости волн равны.

2. Зависимость волновых колебаний от глубины

Для того чтобы получить зависимость амплитуды колебаний от глубины, использовалась видеозапись перемещения частичек полистирола нейтральной плавучести диаметром 0.03 мм. На рис. 2 совмещены последовательные видеокadres (скорость записи 25 кадров в секунду). В верхней части показаны поверхности воды, зафиксированные на трех кадрах. В нижней части рисунка видны три трека частички полистирола.

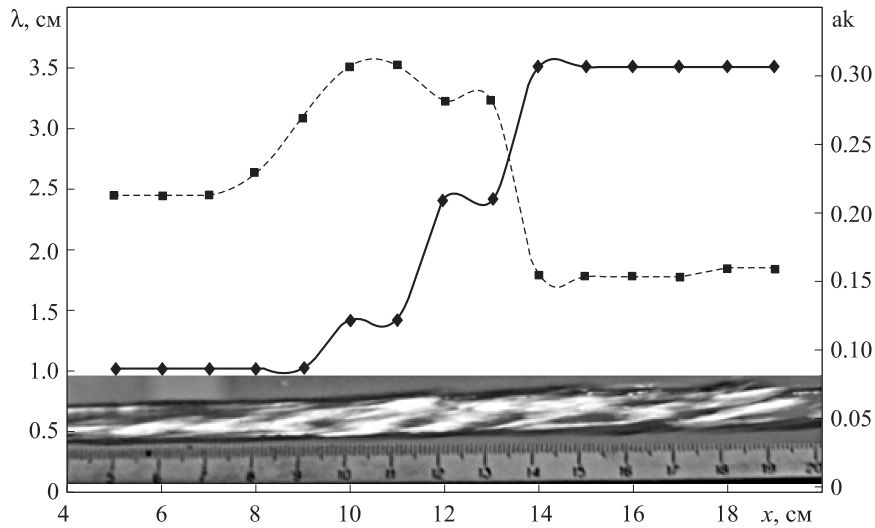


Рис. 1. Поверхность воды в ветровом канале. Зависимость длины (сплошная линия) и крутизны ak (штриховая линия) волны от расстояния до входа в канал

Каждый трек представляет собой путь, пройденный частицей за время съемки данного кадра. Траектория движения частицы позволяет определить амплитуду колебаний волнового движения на данной глубине. Видеокадры обрабатывались с помощью программы Adobe Photoshop. Доверительный интервал измерений для вероятности 0.67 составлял 0.01 см.

Запись отклонений свободной поверхности (верхняя часть рис. 2) позволяет определить параметры поверхностной волны. Характер движения частицы определяется фазой волны. На первом и третьем кадрах частица совершает вращательное движение с волной в соседних слоях. Ниже по течению показана траектория движения частицы за семь кадров в одном слое: движение обусловлено горизонтальным дрейфовым течением и вращением в волновой ячейке.

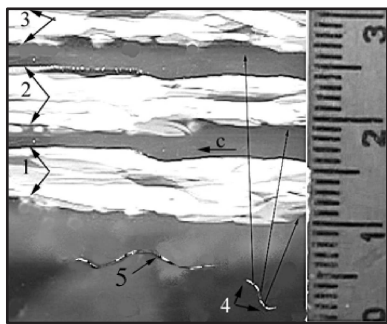


Рис. 2. Три последовательных кадра видеозаписи: в верхней части — поверхность воды на трех кадрах указана цифрами 1, 2, 3; в нижней части — 4 — совмещенные три трека, оставленные одной частицей на кадрах 1, 2, 3; 5 — трек частицы с семи последовательных кадров

Известно, что высота колебаний линейных волн убывает с глубиной по экспоненте

$$h_l \sim h \exp(-ky), \tag{1}$$

где h — высота колебаний на поверхности воды, y — глубина. Можно предположить, что для нелинейных

волн высота колебаний на данной глубине будет расти с увеличением крутизны волны. Для того чтобы проверить это предположение, были исследованы колебания жидкости в серии экспериментов для волн длиной от 1 до 5 см и крутизной от 0.13 до 0.29. По видеозаписи определялась высота волновых колебаний $h_{exp}(y)$ для данного значения крутизны волны.

Результаты приведены на рис. 3. По вертикальной оси отложено отношение измеренной в эксперименте высоты колебаний h_{exp} к h_l , определенной выражением (1). По горизонтальной оси отложено отношение глубины к длине волны y/λ . Графики имеют экспоненциальный характер, причем показатель степени зависит только от крутизны волны. При увеличении крутизны волны показатель степени экспоненты увеличивается как полином значения крутизны волны.

Общая зависимость высоты колебаний может быть записана следующим образом:

$$h_{exp} = h \exp[(p_1 ak - p_2 (ak)^2 - 1)ky], \tag{2}$$

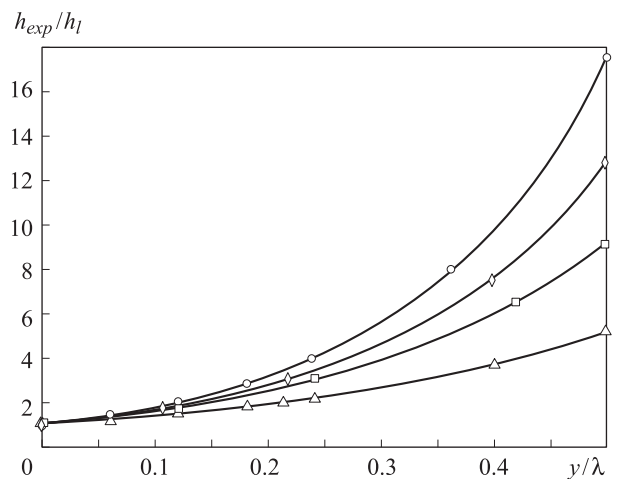


Рис. 3. Зависимость отношения h_{exp}/h_l от y/λ для значений крутизны волны $ak = 0.13$ (треугольники, штрихпунктирная линия тренда), 0.19 (квадраты, пунктирная линия тренда), 0.245 (ромбы, штриховая линия тренда), 0.29 (кружки, сплошная линия тренда)

где h — высота колебаний на поверхности жидкости, коэффициенты $p_1 = 4.64$ и $p_2 = -5.17$, ось y направлена вниз. Полученное выражение подтверждает сделанное предположение о росте толщины слоя волновых колебаний пропорционально крутизне волны. Амплитуда колебаний на приведенной глубине определяется только крутизной волны для исследованного интервала длин волн, удовлетворяющего приближению глубокой воды. Для волн, крутизна которых не превышает значения 0.15, достаточно использовать линейное приближение. Для нелинейных волн большей крутизны необходимо использовать полученное выражение (2). Нелинейная поправка оказывается существенной даже в зоне генерации, так как плоские волны быстро становятся нелинейными, достигают предельной крутизны 0.31 и распадаются на длинные трехмерные волны.

Заключение

В результате проведенного экспериментального исследования глубины проникновения нелинейных вет-

ровых волн на глубокой воде удалось показать, что амплитуда волновых колебаний на глубине, нормированной на длину волны, увеличивается с ростом крутизны волны и определяется только этой величиной. Получено выражение, описывающее зависимость амплитуды колебаний от глубины для нелинейных волн.

Список литературы

1. *Giovangeli J.P., Garat M.H.* // The air-sea interface / Ed. by M. A. Donelan, W. H. Hui, W. J. Plant. Toronto, 1996. P. 41.
2. *Волков П.Ю., Мартынов С.Л., Мельникова О.Н.* и др. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2001. **37**, № 6. С. 834.
3. *Иванова И.Н., Мельникова О.Н., Нивина Т.А.* и др. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. **42**, № 5. С. 703.
4. *Новиков Е.А.* // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 1981. **17**, № 9. С. 956.
5. *Мельникова О.Н., Показеев К.В.* // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. **45**, № 3. С. 420.

Growth of a wave penetration under wind amplifying

O. N. Melnikova^a, K. V. Pokazeev^b

Department of Marine and Inland Water Physics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

E-mail: ^aolamel@yandex.ru, ^bsea@phys.msu.ru.

It is experimentally investigated a depth of a penetrating of nonlinear wind waves. It is found that the amplitude of the deep water nonleaner waves depends only on the wave steepness on the depth normalized on wave length. It is found an expression which connects a growth of wave mass with wave steepness.

Keywords: amplifying of wind waves, depth of waves penetration, nonlinear waves.

PACS: 92.10.hb.

Received 27 January 2010.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 5(2010).

Сведения об авторах

1. Мельникова Ольга Николаевна — докт. физ.-мат. наук, доцент, доцент; кафедры тел.: (495) 939-10-46, e-mail: olamel@yandex.ru.
2. Показеев Константин Васильевич — докт. физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой; тел.: (495) 939-16-77, e-mail: sea@phys.msu.ru.