

Ю. М. КРЫЛОВ, В. В. КУЗНЕЦОВ, С. С. СТРЕКАЛОВ

СИСТЕМЫ ПОЛЯ ВЕТРОВЫХ ВОЛН

(Представлено академиком Л. М. Бреховских 6 VI 1972)

Задача изучения ветровых волн обычно ставится следующим образом. В начальный момент времени над водной поверхностью, ограниченной прямолинейной береговой чертой, возникает однородное поле ветра со скоростью, направленной по нормали от берега в сторону водоема и постоянной по времени. Требуется определить статистические характеристики волн, как функции расстояния от берега и времени. Решая задачу в такой постановке, исследователи (¹⁻⁶) обычно приходили к выводу о развитии системы гравитационных волн с одним основным энергетическим максимумом, амплитуда и период которых растут по мере развития процесса от малых значений до предельных.

Отдельные исследователи отмечали наличие двух и даже трех волновых систем в условиях постоянного ветра. Первые результаты в этом направлении получил Л. Ф. Титов. Изучая стереофотоснимки морских волн, он подметил и количественно описал две категории волн: «преобладающие» и «крупные» (⁷). Можно показать, что первые имеют фазовую скорость, меньшую скорости ветра, а вторые — равную этой скорости. Позднее Г. Нейман (⁸), обобщив результаты наблюдений в океане, пришел к выводу, что под действием постоянного ветра развиваются три «характерных» волновых системы с фазовыми скоростями — меньшей, равной и в 1,2 раза большей скорости ветра. Однако результаты Титова и Неймана не получили развития и впоследствии были заменены концепцией о непрерывном спектре волн с одним энергетическим максимумом (³⁻⁶). И все же в литературе продолжали встречаться высказывания о наличии двух или трех систем волн, как одном из характерных признаков ветрового волнения (^{8, 9}). Отдельные исследователи получали двух- или трехмодальные спектры, но либо не акцентировали внимания на этом факте (^{10, 11}), либо объясняли его неправильно, полагая, что второй максимум обусловлен нелинейными эффектами (^{12, 13}).

На основе анализа измерений в естественных и искусственных водоемах авторы обнаружили и доказали, что в глубоководных водоемах под действием постоянного ветра закономерно развиваются не одна, а две основные, существенно отличающиеся друг от друга системы гравитационных волн. Это явление в естественных условиях особенно четко проявляется в водохранилищах на малых расстояниях от берега при слабых береговых ветрах, когда длины волн двух основных систем различаются в несколько раз, а помехи, пришедшие из соседних районов водоема, практически отсутствуют. На рис. 1 представлены примеры частотных спектров и образцы волнограмм, наглядно свидетельствующие о наличии двух колебательных процессов. На спектрах четко выражены два максимума с фазовыми скоростями, равной и меньшей скорости ветра. Систему с фазовой скоростью, равной скорости ветра, называем резонансной, а с меньшей — дорезонансной. На рис. 2 представлены зависимости основных параметров обеих систем c_i/V и $g\sigma_i/V^2$ от gx/V^2 , где c_i — фазовая скорость системы σ_i — среднеквадратичное отклонение возвышения взволнованной поверхности, V — скорость ветра на верхней границе приводного слоя, g — ускорение силы тяжести, x — расстояние до подветренного берега. Значе-

ние $i = 1$ соответствует резонансной системе, $i = 2$ — дорезонансной. Данные натурных и лабораторных измерений получены путем статистического анализа волнограмм. Фазовая скорость определена по положению энергетического максимума, а среднеквадратичное отклонение σ_i — по площади под кривой спектральной плотности каждой системы. Максимальные относительные ошибки измерений безразмерных параметров не превосходят $\pm 25\%$.

Данные рис. 2 свидетельствуют о следующих закономерностях обнаруженных систем. Фазовая скорость резонансной системы равна скорости

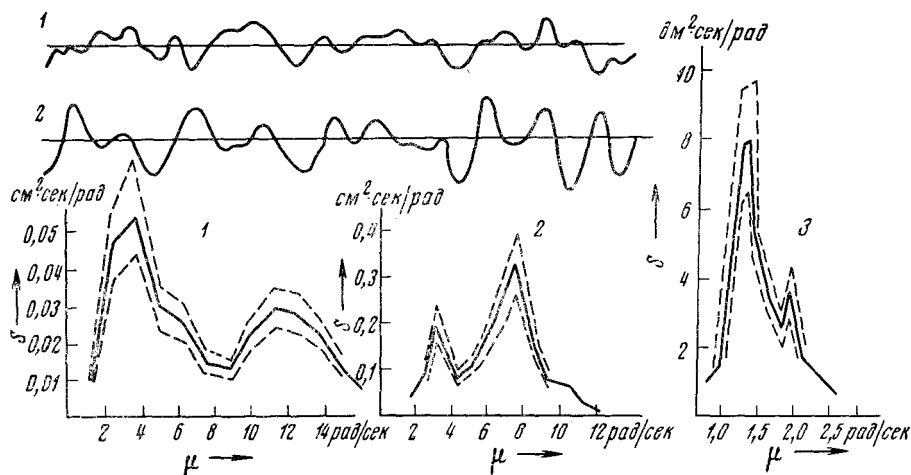


Рис. 1. Образцы волнограмм и частотные спектры $S(\mu)$ для стадий развития ветровых волн: 1 — начальной (по измерениям на Рыбинском водохранилище при расстоянии от подветренного берега 100 м и $V = 3,2$ м/сек) ^(16, 17); 2 — ранней (по тем же измерениям на расстоянии 320 м); 3 — поздней (по измерениям на Черном море при расстоянии 150 км и $V = 8$ м/сек) ⁽¹⁸⁾. Штриховыми линиями показаны границы доверительного интервала 90% вероятности

ветра, а скорость дорезонансной — быстро растет по мере удаления от берега и достигает предела, приблизительно равного 0,8 от скорости ветра. Дорезонансная система сравнительно быстро достигает энергонасыщения, а резонансная продолжает развиваться. На ранних стадиях энергия дорезонансной системы больше энергии резонансной, а на поздних — наоборот. Весьма примечательно, что дорезонансная система возникает не при $gx/V^2 = 0$, как считали ранее ⁽¹⁻⁶⁾, а при значении $gx_0/V^2 > 0$, где x_0 — критическое расстояние от подветренного берега, зависящее от физических характеристик турбулентного вязкого подслоя потока воздуха при его переходе с суши на воду. Эта новая закономерность отражена на рис. 2 штриховыми линиями для различных значений параметра gx_0/V^2 .

Физическая причина развития резонансной системы состоит в том, что среди вихрей, возникающих в турбулентном пограничном слое и переносимых ветром, всегда имеются такие, горизонтальные размеры которых близки к длине гравитационных волн, распространяющихся со скоростью ветра. Именно эти вихри и ответственны за возникновение и развитие резонансной системы. Отсюда следует, что в водоеме с глубиной H резонансная система не развивается, если скорость ветра $V > \sqrt{gH}$. Физика развития дорезонансной системы изучалась многими исследователями ^(1-3, 10). Ее возникновение обязано вихревым движениям в турбулентном вязком подслое ветрового потока. Развитие происходит таким образом, что индуцированное поле давлений в воздушном потоке приводит к росту волн по схеме обратной связи до тех пор, пока поступление энергии не сбалансируется диссипацией.

Помимо двух основных систем развивается и третья, суперрезонансная, с фазовой скоростью, большей скорости ветра. Физическая причина возникновения и развития этой системы заключается в нелинейном взаимодействии двух основных систем. Согласно теории Филлипса, частота волны взаимодействия, амплитуда которой линейно возрастает во времени,

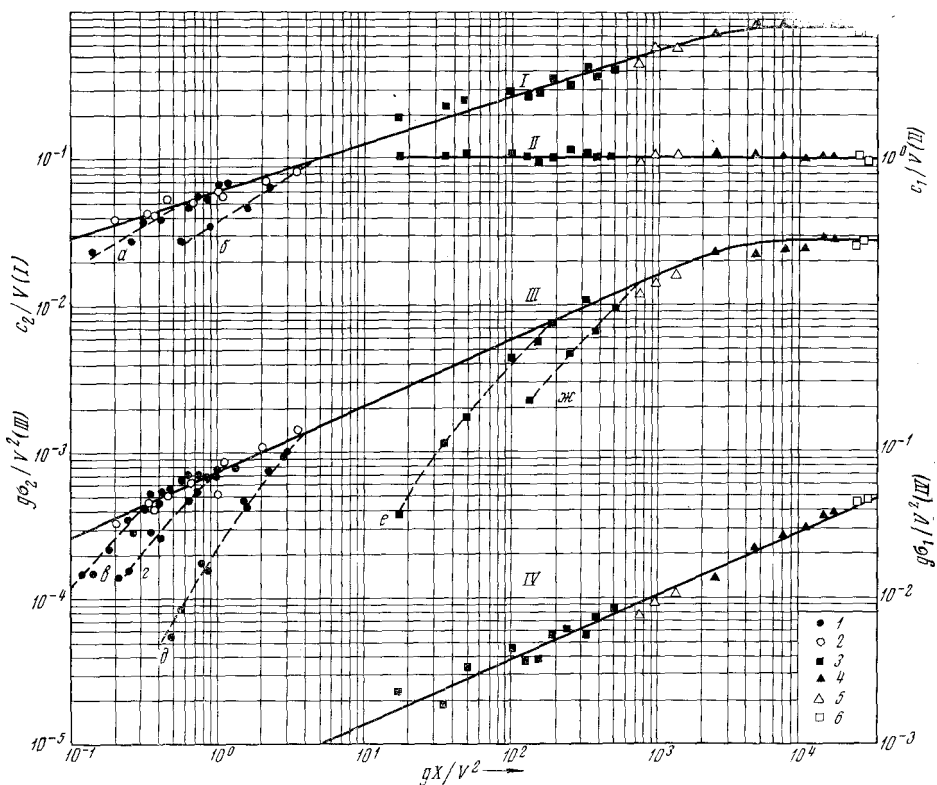


Рис. 2. Зависимости c_2/V (I), c_1/V (II), $g\sigma_2/V^2$ (III), $g\sigma_1/V^2$ (IV) от gX/V^2 по данным измерений в лаборатории: 1 — по ⁽¹⁵⁾, 2 — по ⁽¹⁴⁾; в натуре: 3 — по ^(16, 17), 4 — по ⁽¹⁹⁾, 5, 6 — по ^(18, 19). Штриховыми линиями показаны начальные стадии роста по параметру $g\sigma_0/V^2$ дорезонансной системы. а — $g\sigma_0/V^2 = 6,9 \cdot 10^{-3}$, $V = 9$ м/сек; б — $7,6 \cdot 10^{-2}$, 6 м/сек; в — $6,5 \cdot 10^{-4}$, 15 м/сек; г — $6,9 \cdot 10^{-3}$, 9 м/сек; д — $7,6 \cdot 10^{-2}$, 6 м/сек; е — 7,7, 3,2 м/сек; ж — $3,7 \cdot 10$, 2 м/сек

равна удвоенной меньшей частоте за вычетом другой частоты ⁽¹⁰⁾. Принимая, согласно рис. 2, $c_2 = 0,8 V$, получаем для суперрезонансной системы $c_3 = 1,3 V$, что согласуется с результатами Неймана ⁽⁶⁾. Энергия третьей системы соизмерима с энергией двух других систем на поздних стадиях развития процесса ⁽⁶⁾. Другим интересным следствием наличия трех систем является развитие длиннопериодных волн с разностными частотами, что подтверждается данными спектрального анализа ⁽⁵⁾.

Изложенные факты и соображения по-новому и с единых позиций объясняют процесс ветрового волнения в целом: в лаборатории, на озерах, водохранилищах доминирует одна система (дорезонансная), в морях — две (резонансная и дорезонансная), в океанах — три (суперрезонансная, резонансная и дорезонансная).

Государственный проектно-изыскательский
и научно-исследовательский институт
морского транспорта
«Союзморпроект»
Москва

Поступило
30 V 1972

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ В. В. Шулейкин, Физика моря, изд. 3, М., 1969.
- ² Л. Ф. Титов, Ветровые волны, Л., 1969.
- ³ С. А. Китайгородский, Физика взаимодействия атмосферы и океана, Л., 1970.
- ⁴ Ю. М. Крылов, Спектральные методы исследования и расчета ветровых волн, Л., 1966.
- ⁵ В. С. Бычков, С. С. Стрекалов, Морские нерегулярные волны, М., 1971.
- ⁶ В. Kinsman, Wind Waves, New-Jersey, 1965.
- ⁷ Н. Н. Зубов, Динамическая океанология, М.—Л., 1947.
- ⁸ В. В. Лонгинов, Динамика береговой зоны бесприливных морей, М., 1963.
- ⁹ Г. В. Ржеплинский, Тр. Гос. океаногр. инс., 48, (1959).
- ¹⁰ O. M. Phillips, The Dynamics of the Upper Ocean, Cambridge, 1966.
- ¹¹ J. Garrett, J. Mar. Res., 27, № 3 (1969).
- ¹² W. J. Pierson, J. Geophys. Res., 64, № 8 (1959).
- ¹³ И. Н. Давидаш, Тр. координационных совещаний по гидротехнике, 50 (1969).
- ¹⁴ H. Mitsuyasu, Rep. Res. Inst. Appl. Mech., 16 № 55, Tokio (1968).
- ¹⁵ G. M. Hidy, E. J. Plate, J. Fluid Mech., 26, № 4 (1966).
- ¹⁶ Г. Е. Кононкова, В. В. Кузнецов, Вестн. Московск. унив., № 4 (1970).
- ¹⁷ G. E. Kononkova, V. V. Kuznetsov, Abstr. Pap. 12, Coast. Eng. Conf. Washington, 1970.
- ¹⁸ Г. В. Ржеплинский и др., Тр. Гос. океаногр. инст., 93 (1968).
- ¹⁹ S. S. Strekalow, S. T. Massel, Arch. hydrotechn., 18, № 4, Gdansk (1971).