

Академик В. В. ШУЛЕЙКИН

**ВНУТРЕННИЙ МЕХАНИЗМ ПИТАНИЯ ВОЛН ЭНЕРГИЕЙ ВЕТРА**

В двух недавних работах (<sup>1, 2</sup>) мы рассмотрели с формальной стороны внешние условия питания волн энергией от ветра и попытались приближенно найти заведомо сильно завышенный предел для скорости нарастания волн. Однако эти внешние условия необходимы, но не достаточны для устойчивого питания волн энергией ветра. В настоящей статье попытаемся осветить внутренние причины нарастания энергии водных частиц под воздействием ветра на волну.

В статье (<sup>1</sup>) был рассмотрен процесс периодических колебаний атмосферного давления над поверхностью раздела вода — воздух: понижение давления над вершинами волн и повышение над подошвами по сравнению с давлением на плоскость, проходящую через середины высот волн. Мы позволили себе уподобить этот процесс другому, известному с давних пор: процессу раскачивания качелей за счет ритмических движений человека. И в том и в другом случае наибольшая часть энергии характеризует чисто обратимый цикл, и поверхностному наблюдателю может показаться, что система в целом возвращается каждый раз к одному и тому же потенциальному уровню. В действительности и в том и в другом случае в продолжение каждого цикла происходит некоторый необратимый процесс, приводящий к непрерывному нарастанию энергии колеблющейся системы.

В случае качелей было легко обнаружить и подробно описать с количественной стороны такой необратимый процесс. В случае волн нам мешало отсутствие подробных и достаточно надежных характеристик поведения системы в различных фазах колебаний: ведь закон изменения давления на поверхности раздела в различных фазах колебания уровня был найден различными экспериментаторами только применительно к таким профилям, которые не имеют ничего общего с профилем настоящей ветровой волны. Пришлось специально поставить опыты в этом направлении, учтя истинную форму профиля (<sup>3</sup>).

Не удалось попытки непосредственного измерения колебаний давления воздуха на поверхности раздела в штормовом бассейне: все существующие приборы оказались или недостаточно стойкими в тяжелых условиях над волнами непостоянной амплитуды, или недостаточно чувствительными. Пришлось произвести точные измерения давлений в аэродинамической трубе, на нижней стенке которой были установлены тщательно выполненные профили ветровых волн (по материалам киносъемки в бассейне).

В основу измерений были положены следующие тезисы, требовавшие подтверждения на опытах:

а) Необратимый процесс при колебаниях давления увеличивает количество движения водных частиц, описывающих приблизительно круговые орбиты.

б) Приращение энергии движения частиц за один период колебаний уровня осуществится в необходимом размере, если, при прохождении частицы через какой-то уровень, давление воздуха на единицу поверхности воды в нисходящем движении будет достаточно превышать давление в восходящем движении частицы.

в) Работа внешних сил, характеризующая необратимый процесс за один период колебания уровня (в расчете на единицу поверхности моря), может быть определена на основании соотношения:

$$E_T = \int_0^h (p_y^* - p_y') dy \text{ эрг / см}^2. \quad (1)$$

Здесь через  $p_y'$  обозначено давление воздуха на единицу поверхности моря (в динах на  $\text{см}^2$ ) на участке, который поднялся на  $y$  над плоскостью, проходящей через подошвы волн; через  $p_y^*$  обозначено давление воздуха на участке, который пришел на тот же уровень  $y$  при опускании с высоты  $h$  вершины волн. В формуле (1) приближенно принято, что косинусы углов между нормалью к поверхности воды и вертикалью равны единице.

г) Отсюда следует, что в результате необратимого процесса воде передается мощность, которая определяется по формуле:

$$W_v = \frac{10^{-3}}{T} \int_0^h (p_y^* - p_y') dy \text{ вт / м}^2. \quad (2)$$

Эта мощность за вычетом потерь на турбулентное трение определяет собой нарастание кинетической и потенциальной энергии волн.

Модели волн были изготовлены двух родов: с отношением высоты к длине волн  $h/\lambda = 0,06$  и с отношением  $h/\lambda = 0,12$ . В обоих случаях длина волн была  $\lambda = 50$  см, а параметр, характеризующий «заостренность вершин» (3), был  $\kappa = 0,48$ ; иными словами, плоскость, проведенная через середины высот волн, рассекала вершинами и подошвами волн на полосы, ширины которых находились в отношении  $0,48 : 1$ .

Поверхность волн была выполнена из тонкого трансформаторного железа, наложенного на точно выпиленные шаблоны. Вдоль рабочей части трубы укладывалось 5 волн, причем вход воздушного потока на модель и сток с нее происходили на подошвах волн.

Исследованиям подвергался участок спереди и сзади центральной вершины: от вершины до подошвы на наветренной и на подветренной сторонах. В железе были просверлены отверстия диаметром 1,2 мм, одно из которых располагалось в точности на вершине волны, на равных расстояниях от боковых стенок трубы; на склонах находилось по 17 отверстий, расположенных попарно на одной и той же высоте; последняя пара располагалась на подошвах волн.

Под отверстиями были выведены сквозь нижнюю стенку трубы медные трубки, от которых шли шланги к доске с гнездами. Во время опытов мы пользовались тремя микроманометрами. Один из них приключался к каждой из соответствующих пар гнезд для измерения величины  $p_y' - p_y'$ . Получаемый отсчет исправляли, вычитая из найденной величины тот перепад давления в аэродинамической трубе, который обусловлен сопротивлением по отношению к воздушному потоку.

Для определения поправки служил отсчет по второму микроманометру, присоединенному постоянно к отверстиям «+17» и «-17». Понятно, что разность давлений между этими точками, лежащими на двух подошвах волн, вызвана именно перепадом давления в трубе.

Найдя эту разность и приняв закон падения давления в трубе (за счет внутреннего сопротивления) линейным, легко вычислить поправки для любой пары точек. Третий микроманометр был соединен с обычной измерительной трубкой, посредством которой определялась скорость потока в трубе.

Вентилятор вращался посредством асинхронного мотора, а потому скорость потока менялась во времени не более, чем на несколько процентов. Скорость ветра на оси трубы была  $V = 22,5 \text{ м/сек} \pm 3\%$ . Следовательно, приняв за характеристический линейный размер длину

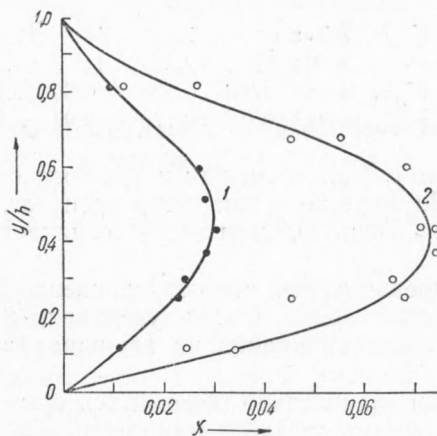


Рис. 1

волн и положив кинематическую вязкость воздуха  $\nu = 1,45 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{сек}$ , можно отметить, что значение критерия Рейнольдса было:

$$Re = 7,8 \cdot 10^5.$$

Есть основания полагать, что такой порядок величины  $Re$  гарантирует достаточную надежность при пересчетах с нашей модели на натуру.

На рис. 1 графически изображены результаты опытов в трубе. По оси абсцисс отложены значения безразмерной величины

$$\chi = \frac{p_y - p'_y}{\delta_a V^2}, \quad (3)$$

которая соответствует той или иной высоте  $y$  пары точек над подошвой волн. Здесь  $\delta_a$  — плотность воздуха. По оси ординат отложены значения величины  $y/h$ .

Кривая (1) соответствует опытам с первой моделью ( $h/\lambda = 0,06$ ), а кривая (2) — со второй моделью ( $h/\lambda = 0,12$ ).

Определив площади кривых на рис. 1, легко вычислить для каждого из двух профилей среднее значение  $\bar{\chi}_1$  и  $\bar{\chi}_2$ , на протяжении от подошвы волн до вершины, по вертикали:  $\bar{\chi}_1 = 0,018$ ;  $\bar{\chi}_2 = 0,042$ .

С другой стороны, зная эти значения, остается лишь вычислить мощность, передаваемую волне ветром. Действительно, сопоставим соотношения (2) и (3). Условимся выражать скорость ветра  $V$  и фазовую скорость волн  $c$  в метрах в секунду, высоту волн  $h$  в метрах, а плотность воздуха  $\delta_a$  в килограммах на кубический метр. Тогда получим простую формулу, которую обобщим на случай потока воздуха над движущимися волнами:

$$W_v = \bar{\chi} \cdot \frac{h}{T} \delta_a (V - c)^2 \text{ Вт/м}^2. \quad (4)$$

Если отношение высоты к длине волн не равно отмеченным частным значениям, то можно вычислять соответствующую величину  $\chi$ , интерполируя между найденными цифрами или в случае надобности производя экстраполяцию.

Применив такой прием, попытаемся сличить результаты, полученные по теоретической формуле (4), с результатами наших опытов в штормовом бассейне. Для надежности рассмотрим только те этапы волнообразования, на которых заведомо еще не начиналось разрушение волн под действием мелководья, т. е. начальные этапы. Тогда получим следующую табличку:

$V$	м/сек	8	10	13	17
$V - c$	м/сек	6,5	7,4	11	13,5
$W_{\text{теор}}$	вт/м <sup>2</sup>	0,051	0,120	0,60	1,2
$W_{\text{опыт}}$	вт/м <sup>2</sup>	0,059	0,172	0,93	2,9

Как видим, при не слишком свежем ветре согласие между теорией и опытами хорошее. По мере того как ветер крепчает, это согласие ухудшается. Наконец, при очень сильном ветре возникает расхождение более чем вдвое.

Есть основания предполагать, что непредвиденно большое нарастание мощности, передаваемой волне в этих условиях, вызвано появлением остроконечных волн высоких порядков на вершинах волн исследованного типа.

Тем самым должен значительно облегчиться срыв струй воздуха с заострившихся вершин волн в согласии с гипотезой, высказанной П. Л. Капицей (4), и в конечном счете должна увеличиться асимметрия распределения аэродинамического давления над волнами.

Для проверки этого предположения мы поместили на вершинах всех пяти волн первой модели ( $h/\lambda = 0,06$ ) жестяные уголки, простирающиеся вдоль гребней и направленные ребром вверх. Высота образовавшихся призм была равна 4 мм, т. е. в 7,5 раз меньше высоты волн.

При продувке такой измененной модели обнаружилось, что соответствующие значения  $p'' - p'$  возросли в 6 раз по сравнению с полученными на той же модели без «остроконечных гребешков».

Разумеется, нет возможности предвидеть все параметры действительных волн высоких порядков, возникающих на поверхности основных при очень сильном ветре. Однако можно утверждать, что соотношение (4) рисует правильную основную картину явлений и что отклонения от (4) при очень сильном ветре удовлетворительно объясняются предложенной теорией.

Морской гидрофизический институт  
Академии наук СССР

Поступило  
15 IX 1953

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

<sup>1</sup> В. В. Шулейкин, ДАН, 91, № 5, 1079 (1953). <sup>2</sup> В. В. Шулейкин, ДАН, 92, № 1, 41 (1953). <sup>3</sup> В. В. Шулейкин, ДАН, 93, № 2, 265 (1953). <sup>4</sup> П. Л. Капица, ДАН, 64, 513 (1949).