

ФИЗИКА ЗЕМЛИ, АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

УДК 551.465:556.536

ВЛИЯНИЕ ВИХРЕЙ В ОТРЫВНОМ ПОТОКЕ НА РОСТ НЕЛИНЕЙНЫХ ВЕТРОВЫХ ВОЛН**О. Н. Мельникова, Т. В. Нивина, К. В. Показеев***(кафедра физики моря и вод суши)*

E-mail: olamel@yandex.ru

Предложена гипотеза усиления волн на воде ветром, связывающая рост амплитуды волны с воздействием вихрей, образующихся в воздухе на подветренном склоне волны. Предполагается, что вихри притягивают поверхность воды, увеличивая амплитуду волны. Гипотеза проверяется на основе экспериментальных данных для нелинейных волн.

На начальной стадии генерации волн ветром на поверхности воды возникают короткие волны с параллельными гребнями. Пока скорость воздушного потока выше фазовой скорости волн $u > c$, амплитуда и фазовая скорость волн растут. Усиление волн связывается с неравномерным распределением давления вдоль волны. Несмотря на значительный накопленный материал, соответствия между расчетными и экспериментальными данными об усилении нелинейных волн получить до сих пор не удалось [1]. 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 приводный слой после его остановки. В работе [3] с помощью интеграла Коши–Лагранжа рассчитано распределение давления вдоль волны с учетом вертикального сдвига скорости, возмущений, создаваемых вихрями, и периодического торможения вязкого слоя. Рассчитанная скорость роста амплитуды линейной волны оказалась близка к экспериментальному значению. Для нелинейных волн расчеты не выполнялись. В [4] показано, что вихри, образующиеся у поверхности воды, притягивают к себе полосу поверхности воды шириной близкой двум диаметрам вихря за время $\tau = \sqrt{D}/\sqrt{g}$, где D — расстояние между вихрем и водой. Можно предположить, что вихри, образующиеся в воздухе над передним склоном волны, притягивая к себе поверхность воды, увеличивают амплитуду нелинейной волны.

Целью настоящей работы является экспериментальная проверка этого предположения в лабораторном канале.

Эксперименты проводились в прозрачном канале длиной 3.5 м, высотой 40 см, шириной 20 см. Высота воздушного канала над водой 10 см. Исследование проводилось с помощью видеозаписи процесса и анемометров. 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, $k = 2\pi/\lambda$, λ — длина волны), и на поверхности возникают трехмерные волны большей длины. В работе [3] показано, что вихри образуются в вязком слое воздуха над передним склоном волны, расстояние между вихрями s и период отрыва T определяются выражениями

$$s = Tu_s - \frac{\delta}{2C_f} \ln \left(1 + u_s \frac{2C_f}{5|u_x|\delta} \right),$$

$$T = \left(\frac{2\delta}{5u_s|u_x|C_f} \right)^{1/2} \operatorname{arctg} \left(\sqrt{\frac{2u_s C_f}{5|u_x|\delta}} \right), \quad u_x = \frac{\partial u}{\partial x}.$$

Здесь y — вертикальная координата, u_s — средняя скорость на приводной линии тока, δ — толщина вязкого слоя с линейным вертикальным профилем скорости, C_f — коэффициент трения скольжения (для воздуха по поверхности воды при 20°C $C_f = 0.005$). Для указанного диапазона изменения скорости ветра $u_s = u/10$, $\delta = 0.05$ см, радиус вихря $r = \delta/3 \approx 0.017$ см, расстояние от вихря

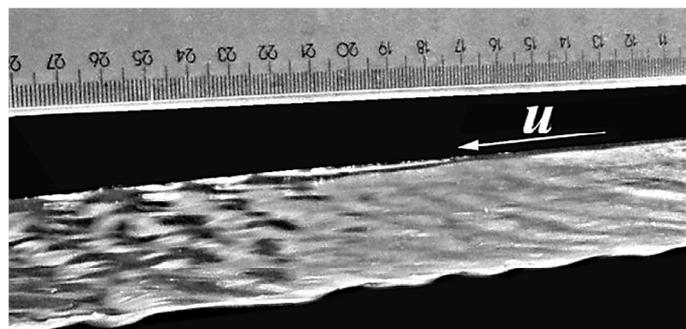


Рис. 1. Поверхность воды в ветровом канале

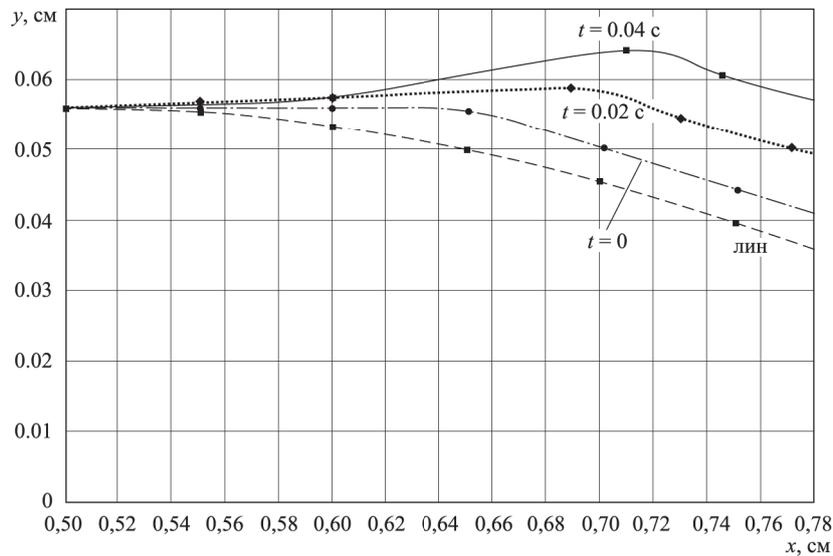


Рис. 2. Изменение нелинейной волны на подветренном склоне. Для сравнения приведен профиль линейной волны той же амплитуды (пунктир)

Параметры вихрей и волны

Кадр	t , с	x , см	c , см/с	λ , см	ak	T , с	s , см	a , см	a_{calc} , см
1	0	18.5	28.5	1.80	0.195	0.007	0.18	0.056	
2	0.04	19.7	30.5	1.81	0.232	0.006	0.15	0.066	0.065
3	0.08	21.0	33.0	1.86	0.270	0.006	0.15	0.080	0.082
4	0.12	22.3	35.8	1.91	0.309	0.005	0.13	0.094	0.093

до поверхности воды $D = r$. Для расчета параметров вихрей определялось изменение скорости ветра вдоль профиля волны $u(x)$. Измерения показали, что $u(x)$ может быть аппроксимирована выражением $u(x) = u(h)h/f(x)$, где h — вертикальная координата, на которой наблюдается максимум скорости ветра, $f(x)$ — координата поверхности воды, определяемая по видеозаписи, начало координат располагаем на невозмущенной поверхности воды в системе координат, связанной с волной.

При каждом формировании вихрей на подветренном склоне волны происходит деформация ее поверхности. Рассчитывая количество вихрей, образовавшихся за промежуток времени ΔT , можно определить изменение амплитуды волны при условии, что если $T < \tau$, то каждый вихрь смещает полоску поверхности воды длиной $4r$ на расстояние r в перпендикулярном направлении. Расчеты показали, что на рост амплитуды волны влияют вихри, образующиеся в верхней части склона, — верхушка волны поднимается и смещается вперед (рис. 2), а градиент скорости ветра медленно растет. С увеличением градиента скорости ветра расстояние между вихрями и период их вылета уменьшается. Однако за промежуток времени между двумя последовательными кадрами видеозаписи $\Delta T = 0.04$ с, параметры вихрей меняются не более чем на 10%. В таблице приведены параметры вихрей (осредненные за время ΔT) и волны для последовательных кадров, позволяющие сопоставить расчетные

и экспериментальные данные: a — амплитуда волны в кадре, a_{calc} — расчетное значение амплитуды, скорость ветра на высоте $h = 1$ см равна $u = 5$ м/с, t — время, x — расстояние от входа в канал, c — фазовая скорость волны.

В представленном диапазоне значений оси x нелинейная волна является плоской. На последнем кадре крутизна волны достигает предельной величины, для $x > 22.3$ см волна распадается на трехмерные волны большей длины (рис. 1). Расчетные и экспериментальные данные отличаются на величины, лежащие в пределах доверительного интервала определения амплитуды волны (0.004 см для вероятности 0.67). Хорошее соответствие данных подтверждает предложенную гипотезу, а предложенный метод может быть использован для прогноза роста нелинейных волн.

Литература

1. Giovangeli J.P., Garat M.H. // The air-sea interface. 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 океана и атмосферы. 2006. **42**, № 5. С. 703.
4. Новиков Е.А. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1981. **17**, № 9. С. 956.

Поступила в редакцию
07.12.2007