

## Торможение дрейфового течения на склонах ветровых волн в зоне усиления

О. Н. Мельникова<sup>a</sup>, К. В. Показеев, А. А. Рожновская<sup>b</sup>

*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: <sup>a</sup>olamel@yandex.ru, <sup>b</sup>nastya.sniper@mail.ru*

Статья поступила 19.12.2012, подписана в печать 16.03.2013.

Экспериментально исследовано дрейфовое течение на склонах ветровых волн в зоне их усиления. Обнаружено, что на переднем склоне волны дрейф падает пропорционально крутизне волны. Проверяется гипотеза, связывающая падение дрейфовой скорости на переднем склоне волны с формированием вихрей в вязком слое воздуха. Предложена физическая модель явления и метод расчета падения дрейфа на переднем склоне волны в зоне усиления. Расчеты, выполненные по модели, хорошо согласуются с экспериментальными данными в пределах ошибки измерения, не превышающей 10% от измеряемой величины.

*Ключевые слова:* ветровые волны, дрейфовая скорость.

УДК: 532.59, 532.5.032. PACS: 92.10.hb, 92.10.Kp.

### Введение

Для прогнозирования распространения поверхностного загрязнения в океане необходимо определение ветрового дрейфового течения. До настоящего времени составляющая дрейфовой скорости  $u_{dr}$ , связанная с силой трения, изучена очень слабо, в отличие от волновой составляющей [1], хотя скорость вязкого ветрового дрейфа на порядок превышает волновую составляющую [2]. На гладкой поверхности жидкости максимальная скорость дрейфового течения, возникающего при воздействии постоянного ветра, может быть вычислена по формуле, полученной из условия равенства тангенциальных напряжений на горизонтальной границе раздела ламинарных вязких слоев воды и воздуха [3]:

$$\frac{u_{dr}}{u} = \frac{\mu_a \delta_w}{\mu_w \delta_a}, \quad (1)$$

где  $u$  — скорость ветра в однородной части вертикального профиля,  $\mu$  — динамическая вязкость, подстрочный индекс  $w$  — вода,  $a$  — воздух,  $\delta$  — толщина вязкого ламинарного слоя [2]. Зависимости  $\delta(u)$  для воды и воздуха приведены в работе [3]. В [4] исследовано влияние пленок активных веществ на скорость дрейфового течения. В работе [3] экспериментально показано, что значение дрейфовой скорости на гладкой поверхности воды всегда превосходит скорость, наблюдаемую на волновой поверхности при равных значениях скорости ветра и температуры сред. Интервалы измеренных значений дрейфовой скорости для одной и той же скорости ветра при разных значениях крутизны волны весьма широки [5]. Измерения дрейфовой скорости, осредненной по длине волны, в натуральных и лабораторных исследованиях показали, что отношение  $u_{dr}/u$  может отличаться более чем на порядок по разным источникам, от 0.008 до 0.05 [5–7], что требует объяснения. В [8] экспериментально показано, что в зоне усиления ветровых волн величина дрейфовой скорости уменьшается на переднем склоне волны и растет на заднем. В первом случае поток воздуха замедляется

в направлении движения, во втором — ускоряется [9]. Над передним склоном волны происходит периодическое торможение вязкого слоя воздуха, что приводит к образованию вихрей в этом слое [10]. В [8] предполагается, что образование вихрей над передним склоном волны приводит к снижению дрейфовой скорости. Для построения общей модели развития дрейфового течения в зоне усиления ветровых волн необходимо проверить это предположение и построить физическую модель дрейфового течения в зоне падения дрейфовой скорости, что и является целью настоящего исследования. Дрейфовое течение исследовалось на склонах волн экспериментально и рассчитывалось на основе метода, который удалось создать на основе результатов [8–10].

### Аппаратура и методика

Исследования проводились в прозрачном канале из органического стекла длиной 3.5 м, шириной 20 см, высотой 40 см, имеющего на выходе расширение до 50 см для гашения возмущений. Высота воздушного слоя над водой на входе в канал равна 10 см. Воздух поступает на вход в канал через сотовую решетку, сделанную из цилиндров диаметром 0.8 см, длиной 1 см, толщиной стенки 2 мм, служащую для создания течения с линиями тока, параллельными горизонтальной оси канала.

Для исследования скорости воздушного потока использовались полупроводниковые сопротивления (1 кОм) в виде шарика с диаметром 0.2 мм. Одно сопротивление перегревалось относительно среды и использовалось для измерения скорости. На расстоянии 0.5 см (вдоль поперечной горизонтальной оси) помещалось второе «холодное» сопротивление для измерения температуры окружающего воздуха, так как соотношение между сигналом и скоростью воздуха зависело от температуры среды. Сбор данных проводился с помощью АЦП платы с входным сопротивлением 100 Ом. Доверительный интервал определения скорости воздуха для вероятности 0.67 составлял 0.1 см/с.

Для определения дрейфового течения на поверхности воды использовалась видеозапись (25 кадров в секунду) перемещения шариков нейтральной плавучести из полистирола диаметром 0.1 см. Рассматривались частицы на нижней границе водной поверхности (без соприкосновения с воздухом), чтобы исключить воздействие ветра на саму частицу [11]. На рис. 1 приведены последовательные кадры видеозаписи, позволяющие определить скорость смещения частицы вдоль поверхности  $u_{sh}$ , амплитуду  $a$ , длину  $\lambda$  и фазовую скорость волны  $c$ . Дрейфовая скорость  $u_{dr}$  в каждой точке определялась как

$$u_{dr} = u_{sh} - u_w \cos \beta - u_n \cos \beta, \quad u_w = cak, \quad (2)$$

где  $u_w$  — скорость волнового движения,  $u_n$  — скорость дрейфового течения, возникающего в нелинейной волне на горизонтальной поверхности вязкой жидкости [1],  $\beta$  — угол между вектором скорости и касательной к поверхности воды,  $k = 2\pi/\lambda$ .

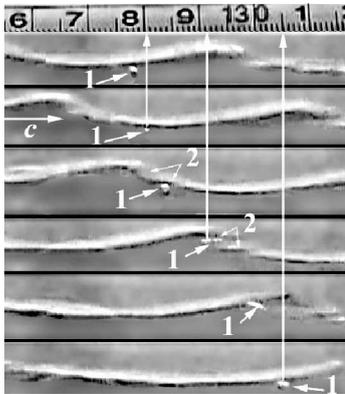


Рис. 1. Последовательные кадры записи волн на расстоянии 130 см от входа в канал,  $u = 4$  м/с: 1 — частица нейтральной плавучести; 2 — деформация переднего склона волны вихрями,  $c$  — фазовая скорость волны

Вблизи зоны генерации  $u_{dr} < c$ , в результате частица поднимается по переднему склону волны и потом спускается по заднему склону (рис. 1). Положение векторов вдоль волны показано на рис. 2. Данные усреднялись по десяти волнам с одинаковыми параметрами, зафиксированными на одном расстоянии от входа в канал. Доверительный интервал составлял 10% от измеряемой величины во впадине и на гребне волны соответственно для доверительной вероятности 0.67.

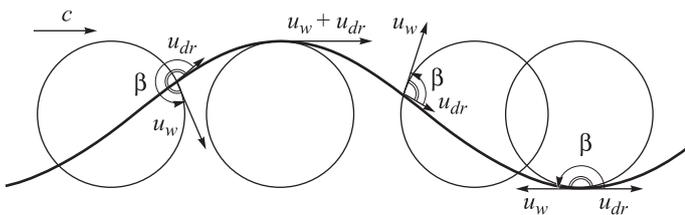


Рис. 2. Схема определения скорости жидкой частицы в ветровой волне:  $u_{dr}$  — дрейфовая составляющая скорости, обусловленная силой трения;  $u_w$  — составляющая скорости, обусловленная волновым движением

### Дрейфовая скорость на переднем склоне волны

Известно, что короткие капиллярно-гравитационные волны формируются в зоне генерации горизонтальным ветровым потоком. Пока скорость воздушного потока выше фазовой скорости волн  $u > c$ , происходит усиление волн вдоль разгона и рост дрейфовой скорости на поверхности воды. На переднем склоне волны дрейфовая скорость убывает, на заднем — растет [8]. Скорость ветра убывает вдоль переднего склона волны, так как сечение потока увеличивается. В [10] экспериментально показано, что в замедляющемся в направлении движения стационарном потоке воздуха происходит периодическая остановка вязкого слоя за счет силы трения о воду и обратного градиента давления на верхней границе слоя. При торможении в слое формируются цилиндрические вихри, вращающиеся как твердое тело, с горизонтальной осью, направленной перпендикулярно оси потока (рис. 1 в [10]). Вихри сворачиваются на одинаковом расстоянии друг от друга и покидают слой после его остановки, а на их месте сразу же формируются новые вихри. Период вылета вихрей и расстояние между ними определяются выражениями [9]

$$s = Tu_s - \frac{\delta}{2C_f} \ln \left( 1 + u_s \frac{2C_f}{5|u_x|\delta} \right), \quad (3)$$

$$T = \left( \frac{2\delta}{5u_s|u_x|C_f} \right)^{1/2} \arctg \left( \sqrt{\frac{2u_sC_f}{5|u_x|\delta}} \right), \quad u_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad (4)$$

$u_s$  — средняя скорость на приводной линии тока,  $\delta$  — толщина вязкого слоя (линейный вертикальный профиль скорости),  $C_f = 0.01$  — коэффициент трения скольжения для воздуха по поверхности воды при 20°С (численно равен кинематической вязкости воздуха). Для  $u > 1$  м/с  $u_s = u/10$ ,  $\delta = 0.05$  см.

В соответствии с (3), (4) чем больше падение скорости ветра на переднем склоне, тем ближе располагаются вихри и чаще вылетают. Для коротких волн длиной  $\lambda < 10$  см и крутизной  $ak > 0.25$  при скорости ветра  $u < 10$  м/с вихри располагаются вплотную друг к другу и успевают сделать не менее 10 вылетов за время прохождения частицей переднего склона волны. Постоянное присутствие вихрей в вязком слое воздуха над передним склоном волны разрушают силу вязкого трения, пропорциональную  $\mu \partial u / \partial z$ . Скорость вращения вихрей определяется перепадом скорости фонового потока (без вихрей) в вязком слое воздуха и условием сохранения  $\text{rot } u$  при образовании вихря в ламинарном фоновом потоке [10]. Учитывая, что на верхней границе вязкого слоя толщиной  $\delta = 3R$  [10] ( $R$  — радиус вихря) скорость ветра равна  $u(\delta) = u/2$ , получаем скорость воздуха на границе твердотельного вихря, вращающегося с угловой скоростью  $\omega$ :

$$u(R) = \omega R = \frac{u(\delta) - 2u_{dr}}{12}. \quad (5)$$

На верхней границе вязкого слоя воздуха эта скорость направлена в направлении воздушного потока, а на нижней границе — навстречу дрейфовой скорости воды. Пренебрегая малыми изменениями поля скорости фонового потока воздуха на переднем склоне волны, получаем задачу о течении плоскопараллельного потока вязкой жидкости в вязком слое воды с пластиной на

поверхности, движущейся навстречу с постоянной скоростью [12, § 334a]. Скорость в вязком слое жидкости удовлетворяет уравнению

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}, \quad (6)$$

где  $\nu$  — кинематическая вязкость воды, считаем слой воды горизонтальным, ось  $z$  направлена вниз, начало координат на поверхности воды. Введем относительную скорость  $V(0) = (u_{dr}(0) - u(R))/2$ , где  $V(0)$  и  $u_{dr}(0)$  — значения относительной и дрейфовой скорости во впадине волны в момент времени  $t = 0$ . Изменение относительной скорости с течением времени  $t$  для заданной глубины  $z$  будет определяться выражением

$$V(t) = V(0) \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\theta e^{-\varphi^2} d\varphi, \quad \theta = \frac{z}{\sqrt{4\nu t}}. \quad (7)$$

Здесь множитель при  $V(0)$  — интеграл ошибок. На поверхности воды при  $z = 0$  разрыв скорости исчезает сразу (условия прилипания). Если определить время  $t$  перемещения частички, находящейся на заданной глубине, вдоль переднего склона, то, используя (7), можно оценить дрейфовую скорость на гребне волны:

$$u_{cr}^{cal} = u(R) + 2V(t). \quad (8)$$

В том случае когда расстояние между вихрями в вязком слое воздуха превышало толщину слоя, интервал времени прохождения переднего склона волны уменьшался в расчетах в  $s/\delta$  раз. Измеренные значения дрейфовой скорости во впадине  $u_{dr}(0)$ , на гребне волны  $u_{cr}$  и результаты расчетов дрейфовой скорости на гребне волны  $u_{cr}^{cal}$ , выполненные по предложенной модели для ряда экспериментов, приведены в таблице. Там же приведены параметры волн, скорость ветра (измеренная в зоне однородного по вертикали профиля над исследуемым участком канала), время прохождения переднего склона  $t$ , расстояние между вихрями  $s$  (рассчитано по (3), (4)). Все результаты получены для глубины  $z = 0.05$  см, на которой перемещался центр шариков диаметром 0.1 см под водной поверхностью (рис. 1). Сравнение результатов расчета с данными эксперимента показывает, что отличия лежат в пределах

| $\lambda$ ,<br>см | $u$ ,<br>см/с | $ak$ | $c$ ,<br>см/с | $u_{dr}(0)$ ,<br>см/с | $t$ ,<br>с | $s$ ,<br>см | $u_{cr}$ ,<br>см/с | $u_{cr}^{cal}$ ,<br>см/с |
|-------------------|---------------|------|---------------|-----------------------|------------|-------------|--------------------|--------------------------|
| 4.8               | 350           | 0.30 | 37.3          | 18.5                  | 0.1        | 0.04        | 8.3                | 7.3                      |
| 6.3               | 410           | 0.25 | 42.5          | 20.6                  | 0.1        | 0.05        | 9.4                | 9.3                      |
| 7.8               | 350           | 0.20 | 40.0          | 13.1                  | 0.1        | 0.09        | 6.6                | 5.1                      |
| 7.4               | 400           | 0.30 | 46.0          | 19.9                  | 0.12       | 0.08        | 8.6                | 8.9                      |

доверительного интервала, не превышающего 10% от измеряемой величины, т. е. вполне удовлетворительны для подтверждения предложенной физической модели в рамках сделанных упрощений.

### Заключение

1. Экспериментальное исследование показало, что дрейфовая скорость на поверхности ветровых волн вблизи зоны генерации растет только на заднем склоне волны, а на переднем склоне падает, причем падение пропорционально крутизне волны.

2. Предложена физическая модель, связывающая торможение дрейфовой скорости на переднем склоне волны с нарушением ламинарного течения в вязком слое воздуха, периодическим торможением и остановкой вязкого слоя, формированием цилиндрических вихрей в вязком слое. Постоянное вращение вихрей в вязком слое воздуха приводит к торможению потока воды на переднем склоне волны, так как скорость вращения вихрей на границе сред направлена против дрейфowego течения.

3. Расчеты дрейфовой скорости на переднем склоне волны, выполненные по предложенной модели, хорошо согласуются с экспериментальными данными в пределах доверительного интервала, не превышающего 10% от измеряемой величины, что подтверждает справедливость модели в рамках сделанных упрощений.

### Список литературы

1. Белоножко Д.Ф., Козин А.В. // Журнал технической физики. 2010. **80**, № 4. С. 32.
2. Wu G. // J. Fluid Mech. 1975. **68**. P. 49.
3. Иванова И.Н., Ильгисонис И.В., Мельникова О.Н., Показеев К.В. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. **41**, № 6. С. 851.
4. Боганов Е.В., Мельникова О.Н., Показеев К.В. // Изв. РАН. Сер. физ. 2006. **70**, № 12. С. 1704.
5. Csapady G.T. // J. Phys. Oceanogr. 1985. N 15. P. 1486.
6. Banner M.L., Melvill W.K. // J. Fluid Mech. 1976. **77**. P. 825.
7. Kamura H., Toba Y. // J. Fluid Mech. 1988. **197**. P. 105.
8. Мельникова О.Н., Показеев К.В., Рожновская А.А. // Изв. РАН. Сер. физ. 2012 **76**, № 12. С. 1515.
9. Мельникова О.Н., Нивина Т.А. // Изв. РАН. Сер. физ. 2008. **72**, № 12. С. 1789.
10. Иванова И.Н., Мельникова О.Н., Нивина Т.А., Показеев К.В. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. **42**, № 5. С. 703.
11. Isobe A., Hinata H., Kako S., Yoshioko S. // Interdisciplinary Studies on Environmental Chemistry—Marine Environmental Modeling & Analysis / Eds. K. Omori, X. Guo, N. Yoshie et al. TERRAPUB. 2011. P. 239.
12. Ламб Г. Гидродинамика. М., 1947.

**Braking drift current on the slopes of wind waves in the amplification zone****O. N. Mel'nikova<sup>a</sup>, K. V. Pokazeev, A. A. Rozhnovskaya<sup>b</sup>***Department of Marine and Inland Water Physics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.**E-mail: <sup>a</sup> olamel@yandex.ru, <sup>b</sup> nastya.sniper@mail.ru.*

It is investigated experimentally for wind drift on the slopes of wind waves in the area of their strengthening. It is found that the drift decreases in proportion to the steepness of the wave on front side of the wave. It is tested the hypothesis linking the fall of the drift velocity to form cylindrical vortices in the viscous layer of air flow. A physical model of the phenomenon and the method of calculating the reduction of the drift velocity are proposed. The calculations performed by the model are in good agreement with the experimental data within the confidence interval of not more than 10% of the measured value.

*Keywords:* wind waves, drift velocity.

PACS: 92.10.hb, 92.10.Kp.

*Received 19 December 2012.*

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 4(2013).

**Сведения об авторах**

1. Мельникова Ольга Николаевна — докт. физ.-мат. наук, доцент, доцент; тел.: (499) 133-87-58, 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.

3. Рожновская Анастасия Александровна — студентка; e-mail: nastya.sniper@mail.ru.