

ФИЗИКА ЗЕМЛИ, АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

Оценка деформации поверхности воды вихрями в вязком слое горизонтального тормозящегося потока воздухаО. 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 26.05.2016, подписана в печать 12.10.2016.

В работе предложена оценка максимальной высоты возмущения на поверхности воды, возникающего при вылете объемного (неточечного) вихря из вязкого слоя горизонтального потока воздуха, скорость которого убывает в направлении движения. Получена зависимость параметров начального возмущения от скорости потока воздуха над поверхностью воды. Показано, что высота возмущения растет, а его ширина уменьшается с ростом скорости потока воздуха. Полученная модель проверена в эксперименте.

Ключевые слова: генерация ветровых волн, деформация поверхности воды массовыми вихрями, массовые вихри в потоке со сдвигом скорости, вязкий слой воздушного потока на границе с водой.

УДК: 534.141.4, 532.5.032. PACS: 47.35.Bb, 92.10.Nm.

Введение

В первом экспериментальном исследовании процесса возбуждения ветровых волн Стэнтон [1] показал, что устойчивые волны длиной 5–6 см возникают при скоростях ветра $u \geq 300$ см/с. Филлипс [2] и Кононкова [3] предположили, что начальные колебания поверхности воды являются отображениями вертикальных импульсов турбулентного воздушного потока. В [4] получены условия возбуждения капиллярных волн малой амплитуды слабым точечным вихрем, расположенным в воздухе над границей двух идеальных жидкостей. В работе [5] впервые получены условия возбуждения устойчивых волн на поверхности жидкости горизонтальным потоком воздуха, скорость которого убывает в направлении движения: устойчивые волны возникают при совпадении периода вылета цепочки вихрей, образующихся в вязком слое потока воздуха T_{ed} , и периода свободных колебаний, определяемого дисперсионным соотношением для группы волн T :

$$s \approx \lambda, \quad T_{ed} = T = \frac{s}{U}, \quad (1)$$

где s — расстояние между вихрями, λ — длина волны, U — групповая скорость волны. В соответствии с [6] в зоне торможения воздушного потока в вязком слое воздуха (вертикальный профиль скорости: $u(y) = u_s + \chi y$, где $\chi = 4u_s/\delta$, u_s — скорость воздушного потока на нижней границе вязкого слоя, δ — толщина вязкого слоя) образуются вихри с угловой скоростью вращения $\omega = \chi/2$. Период вылета вихрей и расстояние между вихрями определяются полуэмпирическими выражениями [6]

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

$$T_{ed} = \left(\frac{2\delta}{5u_s|u_x|C_f} \right)^{1/2} \arctg \left(\sqrt{\frac{2u_s C_f}{5|u_x|\delta}} \right), \quad (3)$$

где C_f — коэффициент трения скольжения воздуха по поверхности воды (безразмерный, для 20°C $C_f = 0.01$). По данным экспериментов [6], если скорость потока вне пограничного слоя $u > 1$ м/с, то $u_s = u/10$, а толщина вязкого слоя $\delta = 0.05$ см. Характеристики вязкого слоя и поверхности раздела χ , δ , C_f определяются экспериментально.

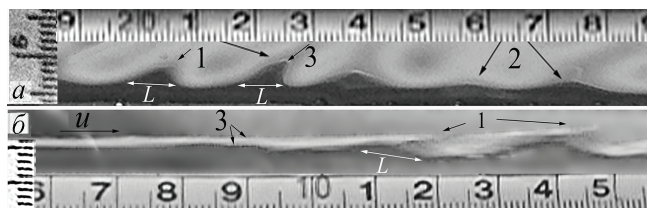
В работе [5] получена зависимость длин устойчивых волн от скорости потока воздуха над поверхностью чистой воды и воды с пленкой легкой нефти. Эта зависимость проверена в лабораторном эксперименте. Однако в работе не даны оценки высот начальных возмущений гладкой поверхности воды, возникающих при вылете объемных вихрей из вязкого слоя воздуха под действием обобщенной силы Жуковского. Воздействие слабых точечных вихрей на поверхность воды было исследовано в работе [4] для случая, когда высота возмущения мала по сравнению с расстоянием от вихря до поверхности раздела. Вихри, формирующиеся в вязком слое тормозящегося потока воздуха, имеют конечные размеры — диаметр вихрей составляет $a \approx \frac{2}{3}\delta$, а высота возмущения поверхности воды может превышать толщину вязкого слоя [6]. Воздействие таких вихрей на поверхность раздела требует экспериментального исследования, так как даже приблизительных оценок деформации поверхности раздела интенсивными объемными (неточечными) вихрями, покидающими вязкий слой воздуха, пока не проводилось. Решение этой задачи и является целью настоящей работы.

1. Методика и аппаратура

Для решения поставленной задачи проведено экспериментальное исследование процесса генерации ветровых волн в прямом канале с прозрачными стенками длиной 3.5 м, шириной 20 см на слое воды толщиной 30 см. Поток воздуха создавался вентилятором и подавался в канал через решетку прямых гладких трубок диаметром 1 см. Скорость ветра определялась с помощью анемометров, описанных в работе [6]. Параметры волн определялись по видеозаписи, сделанной через боковую стенку канала. В экспериментах формировались волны длиной порядка нескольких сантиметров на слое воды толщиной $h = 30$ см, выполнялось условие глубокой воды $\lambda \ll h$.

2. Экспериментальное исследование деформации поверхности воды

На верхнем кадре рис. 1, *а* показана деформация поверхности воды ветровым потоком в начале разгона. Первые крутые узкие гребешки появляются на поверхности воды на участке $19 < x < 23$ см (x — продольная координата, начало координат на поверхности воды на входе в канал), расстояние между гребнями $\lambda = 1.8$ см, высота второго гребешка больше первого. Такая форма гребешков наблюдается только в момент вылета вихрей, который фиксируется по смещению легких частиц пенопласта, захваченных вихрями с поверхности воды (рисунок, *б*). Ниже по течению $x > 24$ см (рисунок, *а*) амплитуда возмущений быстро падает — на поверхности воды остаются гармонические волны малой амплитуды, длина которых близка расстоянию между гребнями на верхнем участке. Средняя скорость ветра на верхнем участке, где наблюдаются крутые короткие гребни (рисунок, *а*), $u = 415$ см/с (u — скорость потока воздуха в однородной части вертикального профиля скорости), она убывает с продольной координатой: $u_x = \frac{\partial u}{\partial x} \approx -4.8$ с⁻¹. В этой зоне образуются вихри, расстояние между вихрями по (2), (3) равно $s = 1.8$ см. Расстояние между вихрями равно расстоянию между гребнями возмущений водной поверхности $s = \lambda$. Ниже — на участке $24 < x < 29$ см — значение $u_x > -1$ с⁻¹. Расчет по (2), (3) дает значение $s > 6.3$ см, которое превышает длину показанного участка. Это объясняет отсутствие вылета вихрей и крутых гребней при $x > 24$ см. Если определить площадь



Деформация поверхности воды горизонтальным потоком воздуха в зоне генерации: *а* — скорость ветра $u = 415$ см/с, *б* — $u = 330$ см/с

Зависимость параметров возмущения поверхности воды от скорости ветра

u , см·с ⁻¹	λ_0 , см	L , см	$h_{\max}$, см	h_{exp} , см
300	3.8	1.3	0.20	0.21
350	2.5	1.1	0.23	0.22
400	2.0	0.9	0.26	0.27
500	1.4	0.7	0.29	0.30
600	1.2	0.5	0.32	0.31

продольного вертикального сечения первого гребня на верхнем участке длиной L и высотой $h_{\max}$, то получим $S_{\text{per}} = 0.12$ см². Площадь сечения второго гребня почти вдвое больше, что можно объяснить последовательным воздействием двух вихрей при выполнении условия образования устойчивых волн. Эксперименты показали, что площадь сечения первого гребня S_{per} и его ширина L у основания начального возмущения возрастают с увеличением скорости ветра, а максимальная высота $h_{\max}$ — убывает. На рисунке, *б* показана поверхность воды в зоне генерации волн воздушным потоком ($u = 330$ см/с, $u_x = -2$ с⁻¹) в момент вылета вихрей над первым и вторым гребнем: выполняются условия формирования устойчивой волны (1), амплитуда волны растет. Зависимость параметров начальных возмущений от скорости потока, полученная в наших экспериментах, приведена в таблице.

3. Оценка высоты возмущения поверхности воды вихрем

В экспериментальном исследовании [7] показано, что в вязком слое тормозящихся потоков жидкости образуются три вихря. Основной — у верхней границы вязкого слоя (радиус вихря в три раза меньше толщины вязкого слоя) за счет обратного градиента давления на верхней границе вязкого слоя и силы трения на нижней границе. Еще два вихря формируются между основным вихрем и поверхностью раздела за счет сил вязкости. Направление вращения основного вихря и вторичных вихрей противоположно. Образование плотной упаковки вихрей, перекрывающей вязкий слой, приводит к тому, что скорость фоновой потока перед вихрем резко снижается, а сдвиг скорости по вертикали исчезает, что обуславливает отсутствие смещения вихрей, наблюдаемое в эксперименте [6, 8]. Однако взаимодействие вихрей друг с другом и с поверхностью раздела приводит к переформированию этой структуры. В вязкой жидкости вторичные вихри вращаются вокруг основного вихря, постепенно на него наматываясь [7, 9]. В результате фоновое течение восстанавливается, что приводит к выбросу основного вихря вверх из вязкого слоя. В работе [7] экспериментально доказано, что движение основного вихря с вихрями спутниками в вязком слое может быть описано моделью движения

цилиндрического вихря в потоке идеальной жидкости со сдвигом скорости [10], если число Рейнольдса вихря $Re = \gamma/\nu \approx \frac{4u_s\delta}{3\nu} > 10$ ($\gamma = 2\omega\pi a^2$, ν — кинематическая вязкость). Для минимальной скорости ветра, при которой наблюдается генерация устойчивых волн, число Рейнольдса воздушного вихря ($\nu = 0.14 \text{ см}^2/\text{с}$) составляет $Re = 13$, что позволяет использовать результаты [10] для определения ускорения вихря в начальный момент времени:

$$\ddot{\eta}_{t=0} = \left(\chi - \frac{\gamma}{2\pi a^2} \right) (u_s + 2a\chi), \quad (4)$$

где η — вертикальная координата центра вихря. Можно предположить, что ускорение фонового потока у поверхности раздела $\dot{u}_s$ в момент вылета вихря будет близко ускорению вылетающего вихря по модулю.

Для того чтобы получить грубую оценку отклонения поверхности воды $h(t, x)$, (t — время) под воздействием отрицательного скачка давления при вылете вихря, будем считать, что слой воздуха толщиной δ на границе с водой из состояния покоя начинает движение под действием ускорения (4). Считаем жидкости идеальными. Дрейфовым течением на поверхности воды пренебрегаем, так как исследуется область в самом начале разгона, где дрейфовое течение еще не сформировалось. Запишем условие баланса давления на поверхности раздела:

$$p_a = p + T_s K, \quad K = h_{xx}(1 + h_x^2)^{-3/2}, \quad h_x = \frac{\partial h}{\partial x}, \quad (5)$$

где p_a , p — давление на поверхности раздела в воздухе и воде соответственно, T_s — коэффициент поверхностного натяжения, K — кривизна поверхности. Движение жидкости фонового потока в этом случае потенциально, а для давления на среднем уровне можно записать

$$p_a = -\rho_a \left[\varphi_t + gy + \frac{1}{2}(\nabla\varphi)^2 \right], \quad p = -\rho gy, \quad (6)$$

где ρ , ρ_a — плотность воды и воздуха соответственно, g — ускорение силы тяжести, $\varphi = u_s x$ — потенциал скорости в воздухе, записанный для замороженной поверхности воды на участке длиной $x = L$, подверженной действию отрицательного скачка давления, y — вертикальная координата (начало координат на поверхности воды). Для расчета давления в (5) нужно определить параметр $\varphi_t = \dot{u}_s L$. Полагая, что $\ddot{\eta} = \dot{u}_s$, получаем выражение для φ_t :

$$\varphi_t = \dot{u}_s L = 7u_s^2 \frac{L}{\delta}. \quad (7)$$

Оценка слагаемых в (6), показывает, что первое слагаемое в квадратных скобках, обусловленное ускорением объемного вихря, на порядок больше остальных членов. Пренебрегая квадратами малых величин, из (4)–(7) получаем приближительную оценку для максимального возвышения поверхно-

сти воды под действием отрицательного скачка давления:

$$h_{\max} \approx \frac{\rho_a}{\rho} \frac{7u_s^2}{g} \frac{L}{\delta}. \quad (8)$$

Результаты расчета максимальной высоты начального возмущения в зависимости от скорости ветра приведены в таблице, где показаны и данные эксперимента. Хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных в пределах доверительного интервала (для вероятности 0.67), не превышающего 10% от измеряемой величины подтверждает допустимость сделанных упрощений для условий эксперимента.

Заключение

Получена оценка возмущения водной поверхности, возникающего при снижении давления при вылете объемного вихря из вязкого слоя горизонтального потока воздуха, скорость которого уменьшается в направлении движения над поверхностью воды. Расчет хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Показано, что вылет вихря из вязкого слоя воздуха дает основной вклад в скачок давления у поверхности воды под вихрем, приводящий к деформации водной поверхности.

Список литературы

1. Stanton T. // Proc. Roy. Soc. A. 1932. **137**. P. 283.
2. Филлипс О.М. Динамика верхнего слоя океана. Л.: Гидрометеиздат, 1980. (Phillips O.M. Dynamics of the Upper Ocean. Cambridge U. Press., 1977.)
3. Кононкова Г.Е., Показеев К.В. Динамика морских волн. М.: Изд-во МГУ, 1985.
4. Новиков Е.А. // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1981. **17**, № 9. С. 956. (Novikov E.A. Izv. Atmospheric and Oceanic Physics. 1981. **17**, N 9. P. 956.)
5. Мельникова О.Н., Показеев К.В. // Вест. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2016. **71**, № 1. С. 123. (Mel'nikova O.N., Pokazeev K.V. // Moscow University Phys. Bull. 2016. **71**, N 1. P. 139.)
6. Волков П.Ю., Достовалова К.В., Еречнев Д.А. и др. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2001. **37**, № 6. С. 834. (Volkov P.Yu., Dostovalova K.V., Erechnev D.A. et al. // Izv. Atmospheric and Oceanic Physics. 2001. **37**, № 6. P. 769.)
7. Мельникова О.Н. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. **41**, № 5. С. 682. (Mel'nikova O.N. // Izv. Atmospheric and Oceanic Physics. 2005 **41**, N 5. P. 620.)
8. Мельникова О.Н., Показеев К.В. // Вест. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2015. № 5. С. 94. (Mel'nikova O.N., Pokazeev K.V. // Moscow University Physics Bulletin. 2015. **70**, N 5. P. 423.)
9. New T.H., Shi S., Zang B. // Experiments in Fluids. 2016. **57**, N 6. P. 109.
10. Жмур В.В. // Океанология. 1988. **XXII**, № 5. С. 709. (Zhmur V.V. // Oceanology. 1988. **XXIII**, N 5. P. 709.)

Estimation of water-surface deformation by vortices in a viscous horizontally decelerating air flow**O. N. Melnikova^a, K. V. Pokazeev^b***Department of Marine and Inland Water Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.**E-mail: ^aolamel@yandex.ru, ^bsea@phys.msu.ru.*

The maximum height of a disturbance on the water surface, which occurs when a spatial (nonpoint) vortex departs from a viscous layer of a horizontal air flow that decelerates in the direction of motion, is estimated. The dependence of the initial disturbance parameters on the air flow speed over the water surface is derived. It is shown that the height of the disturbance increases and its width decreases with an increase in the air flow speed. The suggested model is verified experimentally.

Keywords: generation of wind waves, deformation of the water surface by vortices, vortices in a shift flow, a viscous layer of an air flow near the water surface.

PACS: 47.35.Bb, 92.10.Hm.

Received 26 May 2016.

English version: *Moscow University Physics Bulletin. 2017. 72, No. 3. Pp. 326–328.*

Сведения об авторах

1. Мельникова Ольга Николаевна — доктор физ.-мат. наук, доцент; e-mail: olamel@yandex.ru.

2. Показеев Константин Васильевич — доктор физ.-мат. наук, профессор, тел.: (495) 939-16-77, e-mail: sea@phys.msu.ru.