ФИЗИКА ЗЕМЛИ, АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

Генерация ветровых волн на чистой воде и при наличии нефтяной пленки

О. 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: ^a olamel@yandex.ru, ^b sea@phys.msu.ru

Статья поступила 02.09.2015, подписана в печать 02.11.2015.

В работе получены условия резонансного возбуждения 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, и периода свободных колебаний, определяемых дисперсионным соотношением для группы волн. Получена зависимость длин устойчивых волн от скорости потока воздуха над поверхностью чистой воды и воды с пленкой легкой нефти. Модель проверена в эксперименте.

Ключевые слова: генерация ветровых волн, нефтяная пленка на поверхности воды. УДК: 534.141.4, 532.5.032. PACS: 47.35.Bb, 92.10.Hm.

Введение

Первым экспериментальным исследованием процесса возбуждения ветровых волн является работа Стентона [1]. Он показал, что волны возникают при скоростях ветра *u* > 250 см/с, а длина волны при $u \approx 300$ см/с составляет 5-6 см. В настоящее время наибольшим признанием пользуются теории образования ветровых волн Филлипса [2] и Кононковой [3]. Они предполагают, что начальные колебания поверхности воды являются отображениями вертикальных импульсов, непрерывно воздействующих на воду вследствие турбулентности воздушного потока. Спектры пульсаций скорости воздушного потока были получены экспериментально. Оказалось, что при $u \approx 300$ см/с максимумы спектров колебаний скорости в воздухе приходятся на область частот ~3 Гц, а при возрастании скорости ветра высокочастотные составляющие пульсаций скорости ветра растут. Устойчивые связи между частотами колебаний в воде и воздухе со скоростью ветра позволяют предположить существование регулярной составляющей процесса взаимодействия горизонтального потока воздуха с водной поверхностью. Основой этого взаимодействия служит сила трения на границе раздела. Если же скорость потока воздуха уменьшается в направлении движения (как в основных процессах в натурных условиях), то на верхней границе вязкого слоя потока, в котором скорость убывает по вертикали в направлении поверхности раздела, действует градиент давления, направленный так же, как и сила трения. Прандтль [4] предположил, что действие силы трения и обратного градиента давления может привести к остановке течения в вязком слое потока. Исследования поля скорости в вязких слоях потоков воды и воздуха

показали, что такая остановка действительно происходит [5]. Оказалось, что при торможении вязкого слоя образуются цилиндрические вихри, ось которых направлена по горизонтальной оси перпендикулярно направлению движения потока, причем вихри расположены на одинаковом расстоянии друг от друга. В момент остановки слоя вихри вылетают вверх под действием модифицированной силы Жуковского. В момент вылета происходит резкое увеличение скорости течения во всем вязком слое. Процесс происходит почти периодически, если внешние параметры остаются постоянными, а зоны формирования и вылета вихрей не смещаются [5]. В момент вылета вихрей под ними происходит резкое понижение давления и деформация водной поверхности — возникают предпосылки к генерации ветровых волн [6], длина которых совпадает с расстоянием между вихрями. В работах [5, 6] получены полуэмпирические выражения для расчета параметров процесса, однако в них не обсуждается вопрос соответствия характеристик вынужденных колебаний водной поверхности дисперсионному соотношению для свободных волн на воде: устойчивые колебания возникнут только при выполнении условий резонанса. Исследованию условий резонанса вынужденных и свободных колебаний поверхности воды в воздушном потоке, скорость которого убывает в направлении движения, для чистой воды и при наличии нефтяной пленки посвящена настоящая работа.

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. В начале канала была установлена наклонная крыша длиной 54 см. Под крышей воздушный поток сужался по вертикали от 10 до 5 см, а скорость ветра увеличивалась в направлении движения. В конце крыши скорость воздуха резко падала на участке в 2-3 см, а затем медленно уменьшалась за счет трения о стенки и воду. Скорость ветра определялась с помощью анемометров, описанных в [5, 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 $\lambda \ll h$. В начале эксперимента определялись характеристики процесса на чистой воде, затем в начало канала поступала нефть, объем которой соответствовал сплошной пленке толщиной 50 мкм на всей поверхности воды в канале. Изменения параметров воздушного потока и волн непрерывно фиксировались от начала подачи нефти и до конца прохода пленки по поверхности воды. Параметры нефти: поверхностное натяжение $T_s = 0.031$ н/м, плотность $\rho = 847$ кг/м³, кинематическая вязкость $\nu = 0.0933 \text{ cm}^2/\text{c}.$

2. Условия резонанса

Колебания поверхности воды, возникающие при вылете вихрей, имеют малую амплитуду порядка толщины вязкого слоя (0.05 см) [6], что позволяет применять теорию линейных волн. При воздействии цепочки вихрей, образующихся в вязком слое и вылетающих вверх при периодической остановке вязкого слоя из одних и тех же зон [5], максимумы формирующихся волновых пакетов окажутся под вихрями, а длина основной волны λ должна быть равна расстоянию между вихрями *s*. Вынужденные колебания водной поверхности будут устойчивы, если волновой пакет за период вылета вихрей T_{ed} окажется под следующим вихрем в цепочке. Для этого должно выполняться условие $s = UT_{\rm ed}$, где $U = c - dc/d\lambda$ — групповая скорость линейной волны, а с — ее фазовая скорость. Для волн на глубокой воде [7]

$$U = \frac{c}{2} \frac{1 + (3T_s/\rho g)k^2}{1 + (T_s/\rho g)k^2}, \quad c = \sqrt{\frac{g}{k} + \frac{2\pi}{\lambda} \frac{T_s}{\rho}}, \quad (1)$$

где $k = 2\pi/\lambda$, g — ускорение силы тяжести. Таким образом, условия резонанса обусловлены равенствами $s \approx \lambda$, $T_{\rm ed} = T$, где T — время прохождения пакетом волн участка длиной s.

Период вылета вихрей и расстояние между вихрями определяются следующими выражениями [5]:

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

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

где u — скорость потока воздуха в однородной части вертикального профиля скорости, u_s — скорость воздушного потока на нижней границе вязкого слоя, δ — толщина вязкого слоя (линейный вертикальный профиль скорости), C_f — коэффициент трения скольжения воздуха по поверхности воды (безразмерный, численно равный кинематической вязкости воды для 20°С $C_f = 0.01$). По данным экспериментов [5], если скорость потока вне пограничного слоя u > 1 м/с, то $u_s = u/10$, а толщина вязкого слоя $\delta = 0.05$ см.

Для того чтобы получить условия резонанса, построим зависимость периода вылета вихрей и периода $T = \lambda/U$ от длины волны, полагая выполнение равенства $s \approx \lambda$. Свободными параметрами в (2), (3) для периода вылета вихрей являются и и u_x . На рис. 1 приведены рассчитанные зависимости: сплошной линией показана зависимость $T(\lambda)$, штриховыми линиями $T_{\rm ed}(s=\lambda)$ для скорости ветра 250, 300 и 500 см/с. Для заданной скорости ветра данная длина волны может быть получена для единственного значения продольного градиента скорости u_x , определяемого (2) (3). Полученные данные показывают, что для скорости ветра 300 см/с период вынужденных и свободных колебаний практически совпадают в широком диапазоне длин волн: $5 \leqslant \lambda \leqslant 8$ см. Все волны в этом диапазоне являются резонансными. В таблице даны соответствующие значения продольного градиента скорости воздушного потока u_x , при которых расстояния между



Рис. 1. Зависимости $T(\lambda)$ (сплошная линия) и $T_{\rm ed}(\lambda)$ (штриховые линии)

Зависимость резонансной длины волны от градиента скорости (u = 300 м/с, вода)

λ_0 , см	5	6	7	8
u_x, c^{-1}	-0.92	-0.72	-0.60	-0.50

вихрями в вязком слое совпадают с резонансными длинами волн λ_0 для u = 300 см/с.

Для скорости u = 290 см/с существует только одна резонансная длина волны $\lambda_0 = 4$ см, в которой график $T_{\rm ed}(s=\lambda)$ касается линии $T(\lambda)$. Для скорости u < 290 см/с функции $T_{\rm ed}(s=\lambda)$ и $T(\lambda)$ не имеют общих значений: резонанс невозможен. Это значит, что генерации устойчивых волн не возникает, что совпадает с натурными наблюдениями [1-3]: в этом случае возникает лишь рябь, которая быстро затухает. При скорости и > 320 см/с периоды свободных и вынужденных колебаний для данной скорости ветра совпадают лишь для единственной длины волны, причем с ростом скорости ветра длина резонансной волны λ_0 становится короче, что также совпадает с натурными данными [1-3]. Для скорости ветра 300 < u < 320 см/с график зависимости $T_{\rm ed}(s=\lambda)$ дважды пересекает график $T(\lambda)$, определяя две резонансные длины волны. Зависимость $\lambda_0(u)$ для чистой воды приведена на рис. 2 сплошной линией. Аналогичные расчеты были выполнены для нефтяной пленки на поверхности воды. Зависимость $\lambda_0(u)$ для этого случая приведена на рис. 2 штриховой линией.



Рис. 2. Зависимость резонансной длины волны от скорости ветра для чистой воды (сплошная линия) и при наличии нефтяной пленки (штриховые линии)

Для проверки полученных результатов была проведена серия экспериментов в лабораторных условиях по методике описанной выше: исследована генерация волн на чистой воде, затем на входе в канал подана легкая нефть и исследована генерация волн на воде с нефтяной пленкой.

3. Сравнение расчетных и экспериментальных данных

На верхнем кадре видеозаписи (рис. 3) показана поверхность воды на участке, включающем конец крыши, до начала подачи нефти в экспериментальный канал. Над этим кадром приведена зависимость скорости ветра (в однородной части



Рис. 3. Кадры видеозаписи процесса возбуждения ветровых волн в эксперименте в разные моменты времени: t = 0 — начало подачи нефти на входе в канал. 1 — край крыши, 2 — граница нефтяной пленки. Над кадрами показано распределение скорости ветра вдоль оси x до начала подачи нефти

вертикального профиля) от координаты x (направлена горизонтально вдоль канала, начало координат на поверхности воды на входе в канал). Под крышей, где скорость ветра растет по x, волны на поверхности воды не образуются. У края крыши (x = 54 см) скорость ветра достигает максимального значения u = 350 см/с, затем на участке длиной 2 см резко падает ($\partial u/\partial x = -2.3$ с⁻¹). На этом участке видны волна длиной $\lambda = 2.6$ см, амплитуда которой *а* быстро растет. На расстоянии x = 66 см волна достигает критической крутизны *ak* = 0.31 и распадается на волны малой крутизны длиной 5.2 см в соответствии с результатами работы [8]. Генерация и усиление волны происходит в условиях резонанса: по результатам расчета, приведенным на рис. 1, 2 для скорости ветра и = 350 см/с, длина волны точно соответствует резонансной.

На рис. З приведены кадры видеозаписи, сделанные после начала подачи нефти на входе в канал (t > 0). В момент времени t = 0.72 с пленка нефти толщиной 0.5 мм дошла до координаты x = 52 см. Это привело к снижению (по сравнению с чистой водой) скорости ветра на этой координате до 250 см/с, что обусловлено высокой кинематической вязкостью нефти (вода — 0.01 см²/с, нефть — 0.0933 см²/с). В этот момент времени на всей чистой поверхности воды вне крыши x > 54 см генерация волн не происходит — поверхность воды абсолютно гладкая. Полученный результат соответствует результатам расчета: при такой скорости ветра резонанс невозможен, графики $T(\lambda)$ и $T_{ed}(\lambda)$ не имеют общих точек (рис. 1).

После того как нефтяная пленка покрыла всю поверхность воды (t = 4.28 с), у границы крыши (в зоне максимального изменения скорости по оси x) появляются волны длиной 5.5 см при u = 210 см/с, $u_x = -0.22$ с⁻¹. Сравнение данных расчета функций $T(\lambda)$ и $T_{\rm ed}(\lambda)$ показывает, что они отличаются на 0.015 с, т.е. существует расстройка резонанса. В результате возникающие волны оказываются неустойчивыми: усиления этих волн не происходит, они быстро затухают. Хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных показывает, что при расчетах условий резонанса на пленках нефти толщиной более 0.5 мм можно использовать характеристики собственно нефти.

После прохода всей вылитой нефти на очистившейся поверхности воды вновь наблюдается генерация волн длиной 2–3 см у края крыши, однако развития этих волн нет, они быстро затухают. Можно предположить, что верхний слой воды содержит некоторые растворимые фракции нефти, изменившие основные параметры — поверхностное натяжение, вязкость и плотность. В результате система немного сдвинулась от резонанса, что привело к возбуждению неустойчивых колебаний. Сравнить с данными расчета в этом случае не представляется возможным, так как физические параметры жидкости на границе раздела после прохода нефтяной пленки не определялись.

Заключение

Проведено исследование условий резонанса вынужденных и свободных колебаний поверхности воды в воздушном потоке, скорость которого убывает в направлении движения, для чистой воды и при наличии нефтяной пленки.

Показано, что устойчивые гравитационно-капиллярные волны на поверхности жидкости при воздействии горизонтального потока воздуха, скорость которого убывает в направлении движения, возникают, если период вылета цепочки вихрей из вязкого слоя потока воздуха совпадает со временем, за которое группа волн, генерируемая при вылете вихря на поверхности воды, проходит расстояние между вихрями.

Получены зависимости резонансной длины волны, соответствующей устойчивым волнам на поверхности чистой воды и при наличии пленки нефти, от скорости воздушного потока. Длина резонансной волны определяется горизонтальным градиентом скорости воздушного потока в зоне генерации волн для заданной скорости ветра.

Список литературы

- 1. Stanton T. // Proc. Roy. Soc. A. 1932. 137. P. 283.
- 2. Филлипс О.М. Динамика верхнего слоя океана. Л., 1980. (*Phillips O.M.* Dynamics of the Upper Ocean. Cambridge, 1977.)
- 3. Кононкова Г.Е., Показеев К.В. Динамика морских волн. М., 1985.
- Прандтль Л. Гидроаэромеханика. Ижевск, 2000. (Prandtl L. Führer durch die Strömungslehre. Braunschweig / Wiesbaden, 1990).
- 5. Волков П.Ю., Достовалова К.В., Еречнев Д.А. и др. // Изв. РАН. Физ. 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**, N 6. P. 769.)
- Мельникова О.Н., Нивина Т.А. // Изв. РАН. Сер. Физ. 2008. 72, № 12. С. 1789. (Melnikova O.N., Nivina T.V. // Bull. of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2008. 72, N 12. P. 1693.)
- 7. Лайтхилл Дж. Волны в жидкости. М., 1981. (Lighthill J. Waves in fluids. L.; Cambridge, 1978.)
- Мельникова О.Н., Показеев К.В., Потапов Ф.Р. // Изв. РАН. Сер. физ. 2012. **76**, № 12. С. 1511. (*Mel'-nikova O.N., Pokazeev K.V., Potapov F.R.* // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics. 2012. **76**, N 12. P. 1353.)

The generation of wind waves on clean water and in the presence of an oil film 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: ^a olamel@yandex.ru, ^b sea@phys.msu.ru.

The conditions of the resonant excitation of waves on a liquid surface by a horizontal air flow that has a decreasing velocity in the direction of motion were established, such that steady waves occurred when the period of the escape of a chain of eddies that is generated in a viscous layer of an air flow coincided with the period of natural oscillations, which is determined by the dispersion relationship for a group of waves. The dependence of the lengths of steady waves on the air-flow velocity over the surface of clean water and water with a light oil film was obtained. The resulting model was tested experimentally.

Keywords: generation of wind waves, oil film on water surface.

PACS: 47.35.Bb, 92.10.Hm.

Received 2 September 2015.

English version: Moscow University Physics Bulletin. 2016. 71, No. 1. Pp. 139–142.

Сведения об авторах

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

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