

УДК 532.5.07:544.722.2

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ МАЛОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ НА ГЕНЕРАЦИЮ ВЕТРОВЫХ ВОЛН

© 2022 г. О. Н. Мельникова¹, *, Ю. Ю. Плаксина¹, А. В. Уваров¹,
Д. А. Агапова¹, Д. И. Ильиных¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”, физический факультет, Москва, Россия

*E-mail: olamel@yandex.ru

Поступила в редакцию 14.02.2022 г.

После доработки 28.02.2022 г.

Принята к публикации 23.03.2022 г.

Рассмотрена одна из фундаментальных проблем теории генерации ветровых волн — существование разброса значений критической скорости ветра, при которой возникают устойчивые ветровые волны, крутизна которых растет вдоль разгона. Экспериментально показано, что одной из причин разброса значений критической скорости ветра, является наличие пленки примесей малой концентрации на поверхности воды.

DOI: 10.31857/S0367676522070213

ВВЕДЕНИЕ

Одной из фундаментальных проблем теории генерации ветровых волн, до сих пор не имеющих решения [1], является определение критической скорости ветра, при которой возникают устойчивые волны, амплитуда которых растет вдоль разгона. Ряд работ расширяют границы проблемы и исследуют генерацию малых колебаний водной поверхности длиной порядка микрона, которые фиксируются только в зоне генерации и не становятся устойчивыми волнами [2–4]. Многочисленные натурные наблюдения и лабораторные эксперименты дают широкий диапазон значений критической скорости ветра, при которой формируются устойчивые волны: $2 < u < 3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. В этом диапазоне скорости ветра формируются волны длиной $\lambda \approx 3\text{--}6 \text{ см}$ [4]. Существующие модели генерации ветровых волн [2–6]) не могут объяснить такой разброс критических значений, так как в рамках этих моделей решается линейная задача на устойчивость течения со сдвигом скорости и устанавливается только потеря устойчивости, но не параметры устойчивых возмущений.

Одной из возможных причин смещения границы генерации при одинаковых фиксированных динамических параметрах потоков может быть состояние поверхности воды, на которой могут существовать пленки различной концентрации, которые и меняют условия генерации. Ранее вопрос о влиянии таких пленок подробно рассматривался применительно к условиям кон-

векции за счет испарения с поверхности жидкости при отсутствии ветра [7, 8]. Было показано, что даже в дистиллированной воде концентрации примесей достаточно, чтобы блокировать конвекцию Марангони. По этой причине термин “холодная пленка”, который хорошо известен в геофизике и связывается, как правило, только с температурным полем, необходимо распространить и на гидродинамические движения в жидкости — пленка препятствует массообмену “поверхность—объем”. Но при наличии обдува (ветра) основной характеристикой пленки оказывается ее прочность и в этом случае результат измерений в канале начинает зависеть от чистоты воды. Пленка на поверхности воды может существенно изменить взаимодействие воздушного потока с водой, что может отразиться на таком макропарамetre, как коэффициент трения. Задачей настоящей работы является оценка влияния таких пленок на процесс генерации ветровых волн на гладкой поверхности воды. Задача решалась в серии экспериментов в лабораторном канале.

АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для решения поставленной задачи проведено экспериментальное исследование процесса генерации ветровых волн в прямом канале с прозрачными стенками. Длина канала — 3.5 м, ширина — 15 см, высота слоя воды — 30 см. Горизонтальный поток воздуха создавался вентилятором и пода-

вался в канал через решетку гладких каналов с прямоугольным сечением $1 \times 1 \text{ см}^2$. Скорость потока воздуха составляла от 235 до $620 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$. Параметры волн определялись по видеозаписи, сделанной через боковую стенку канала. В экспериментах формировались волны длиной $1 < \lambda < 5 \text{ см}$. Дрейфовое течение определялось по смещению мелких частиц нейтральной плавучести, помещенных в приповерхностный слой воды.

Процесс генерации волн исследован в двух режимах: непосредственно после заполнения канала водопроводной водой и через двое суток после заполнения. Наличие поверхностной пленки загрязнений фиксировалось с помощью маркеров и инфракрасной камеры. Перемещение маркеров зависело от наличия пленки и ее концентрации. Инфракрасная камера позволяла контролировать конвективное движение, определяемое интенсивностью испарения. На рис. 1 приведен кадр записи, сделанной тепловизором у границы между поверхностью воды, покрытой пленкой (зона 1), и свободной поверхностью (зона 2). В зоне 2 хорошо видна мелкая чешуйчатая конвективная структура, определяемая эффектом Марангони, который блокируется пленкой в зоне 1. Разность средних температур поверхности в зонах 1 и 2 превышает один градус и хорошо фиксируется тепловизором. Эта разность и определяет “скачок температур в холодной пленке”, хорошо известной в геофизике. В экспериментах со свежей водой пленка намного слабее, чем через двое суток, и воздействие ветра на поверхность приводит к разным результатам по величине свободной зоны и условиям генерации волн.

РАВНОМЕРНЫЙ И ЗАМЕДЛЯЮЩИЙСЯ ПОТОКИ ВОЗДУХА

Эксперименты показали, что генерация коротких волн на воде наблюдается только в зоне торможения горизонтального потока воздуха в направлении движения [9]. Этот результат подтвержден в настоящих экспериментах, проведенных в канале с водопроводной водой как сразу после заполнения канала, так и двое суток спустя. На рис. 2а приведен кадр видеозаписи, полученный в режиме с двухсуточной водой в канале с наклонной крышей при максимальной скорости ветра $235 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$. Под наклонной крышей, где скорость течения растет в направлении движения, волны не образуются. На поверхности воды виден неровный контрастный край (белая стрелка) самой толстой части пленки примеси на расстоянии 1 м от входа в канал. На выходе из-под крыши, где скорость падает при расширении воздушного потока, на поверхности воды видны волны в зоне, покрытой толстой пленкой. На рис. 2б приведены два кадра, полученные на входе в ка-

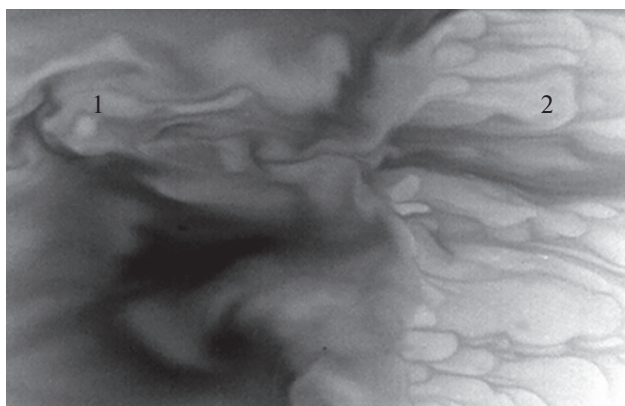


Рис. 1. Поле температур на границе перехода “свободная поверхность—пленка”. Хорошо видна разница в структурах приповерхностного конвекционного течения (зона 1 — пленка, зона 2 — пленка малой концентрации). Максимальная разность температур 1.3°C .

нал в этом же эксперименте. На кадрах видна белая частица нейтральной плавучести, которая при падении на поверхность воды возбуждает круговые волны, как на неподвижной жидкости. Интервал времени между кадрами 0.08 с . Частица не смещается в направлении воздушного потока, что свидетельствует об отсутствии дрейфового течения. В эксперименте со свежей водой в этой зоне существует дрейфовое течение. Отсюда следует, что двухдневная пленка препятствует возникновению сдвигового поверхностного течения в ускоряющемся потоке воздуха, но не препятствует возбуждению импульсных круговых волн. На выходе из-под крыши, где поток воздуха тормозится, пленка не мешает возбуждению ветровых волн (рис. 2а).

Прандтль [10] предположил, что для замедляющих течений действие сил обратного градиента давления и трения может привести к остановке пограничного слоя потока, потери устойчивости ламинарного движения и формированию вихрей. Экспериментальные исследования [9] показали, что такая остановка действительно происходит периодически, что при торможении течения в пограничном слое воздуха образуются цилиндрические вихри, ось которых направлена горизонтально по нормали к направлению движения потока. При возникновении цепочки вихрей у поверхности воды, под вихрями возникает понижение давления, приводящее к деформации водной поверхности [11] — возникают предпосылки вынужденной генерации волн. Такой механизм взаимодействия воздушного потока с поверхностью воды не предполагает учета сил вязкости. Это позволяет формироваться волнам на воде с пленкой под действием цепочки вихрей. В [12] показано, что вихри образуются в потоке жидкости с обрат-

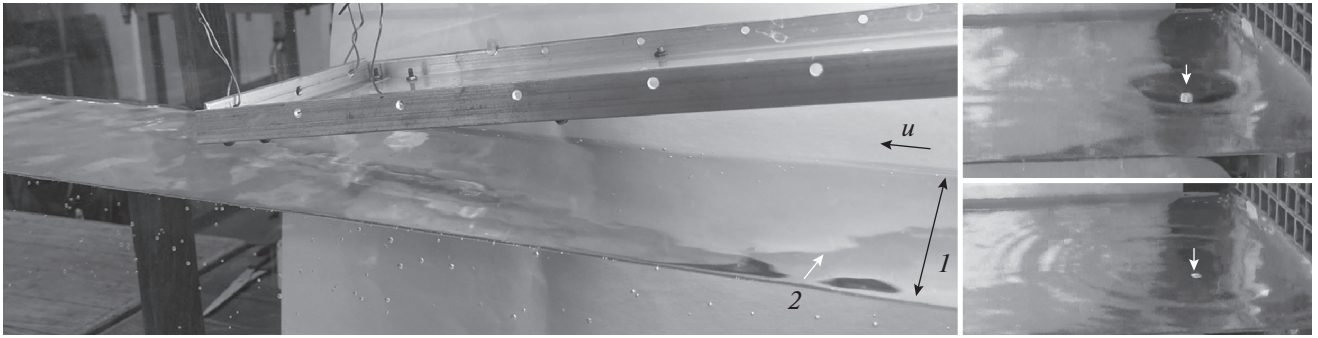


Рис. 2. Ускоряющийся поток воздуха под крышей: 1 – поверхность воды, 2 – край толстой части пленки (а). Вход в канал. Падение частицы на воду с пленкой (частица показана стрелкой) (б). Промежуток времени между кадрами равен 0.08 с.

ным градиентом давления выше вязкого слоя. Можно предположить, что удаленность вихрей от поверхности раздела предотвращает полное разрушение пленки в зоне генерации.

КРИТИЧЕСКАЯ СКОРОСТЬ ПОТОКА ВОЗДУХА

В [13] получено условие соответствия характеристик вынужденных колебаний водной поверхности дисперсионному соотношению для свободных волн на воде: длина волн λ совпадает с расстоянием между вихрями $\lambda = s$, а период T – с периодом вылета вихрей T_{ed} . Только такие колебания оказывались устойчивыми в эксперименте. Параметры вихрей s и T_{ed} получены в [9]:

$$\begin{aligned} s &= Tu_s - \frac{\delta}{2C_f} \ln \left(1 + u_s \frac{2C_f}{5|u_x|\delta} \right), \\ T &= \left(\frac{2\delta}{5u_s|u_x|C_f} \right)^{1/2} \operatorname{arctg} \left(\sqrt{\frac{2u_s C_f}{5|u_x|\delta}} \right), \end{aligned} \quad (1)$$

где u_s – средняя скорость воздушного потока на нижней границе вязкого слоя, $u_x = \frac{\partial u}{\partial x}$, δ – толщина вязкого слоя, C_f – безразмерный коэффициент трения скольжения воздуха по подстилающей поверхности. При $u > 1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ $u_s \approx 0.1u$, а $\delta = 0.05 \text{ см}$ [9].

Параметры вихрей и вынужденных колебаний существенно зависят от силы трения (коэффициента C_f) на границе сред и должны меняться при формировании органической пленки на поверхности воды. При увеличении коэффициента трения расстояние между вихрями и длина волны уменьшается.

В том случае, если скорость потока уменьшалась в направлении движения (в канале без крыши), пленка примеси максимальной концентрации на поверхности воды сохранялась на началь-

ном участке канала протяженностью 10–15 см, что хорошо видно на тепловизоре. Именно в этой зоне происходит генерация волн. Была установлена критическая скорость потока воздуха, при которой происходит генерация устойчивых волн, для двух исследованных режимов, определяемых концентрацией примеси на поверхности воды. На воде, выдержанной 2 суток, критическое значение скорости ветра составило $u = 235 \text{ см/с}$ при длине волны $\lambda = 3\text{--}3.1 \text{ см}$. Если использовать свежую водопроводную воду при той же скорости ветра, то волны на поверхности воды не образуются: начало генерации соответствует скорости 290 см/с при длине волны 5 см. В соответствии с [13], при меньшей скорости ветра не существует устойчивых резонансных значений длины волны, удовлетворяющих и дисперсионному соотношению свободных колебаний, и параметрам вихрей, определяемых соотношением (1): зависимости $T(\lambda)$ и $T_{ed}(s)$ не имеют точек пересечения для гравитационно-капиллярных волн.

Полученное смещение критической скорости ветра, при которой возникает генерация устойчивых волн, соответствует увеличению коэффициента трения в выражениях, определяющих период формирования вихрей T и расстояние между ними s в замедляющемся потоке воздуха (1). В соответствии с данными работы [9] коэффициент трения для свежей водопроводной воды $C_f = 0.08$. Результат, полученный в эксперименте на воде с пленкой, сформировавшейся за двое суток, соответствует увеличению коэффициента трения до значения $C_f = 0.2$. Были рассчитаны параметры вихрей для этого значения коэффициента трения для всех значений скорости ветра, исследованных в эксперименте. По этим данным была построена зависимость резонансной длины волны от скорости ветра для $C_f = 0.2$, представленная на рис. 3 (штриховая линия). На том же рисунке показаны резонансные значения длины волны, полученные в эксперименте с двухсуточной водой. Для

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом показано, что одной из причин сдвига значения критической скорости ветра, при которой начинается генерация устойчивых волн на поверхности воды, является наличие пленки примеси малой концентрации на ее поверхности. Пленка примеси может блокировать развитие вязкого дрейфа на поверхности воды в ускоряющихся в направлении движения потоках воздуха, в которых не возникают ветровые волны.

В тормозящихся в направлении движения потоках воздуха пленка не препятствует генерации ветровых волн, так как волны формируются при воздействии цепочки вихрей, которые периодически формируются в пограничном слое ветрового потока, и этот механизм не связан с вязким взаимодействием воды и воздуха на границе раздела.

Длина устойчивой резонансной волны, возникающей под действием тормозящегося потока воздуха, зависит от концентрации пленки примеси на поверхности воды. Длина волны уменьшается с увеличением концентрации примеси для одной и той же скорости ветра.

Работа была выполнена с использованием оборудования, приобретенного за счет средств “Программы развития Московского университета”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shemer L.* // Atmosphere. 2019. V. 10. P. 562.
2. *Plate E.J., Chang P.C., Hydy G.M.* // J. Fluid Mech. 2006. V. 35. No. 4. P. 625.
3. *Liberzon D., Shemer L.* // J. Fluid Mech. 2011. V. 681. P. 462.
4. *Caulliez G., Ricci N., Dupont R.* // Phys. Fluids 1998. V. 10. No. 4. P. 757.
5. *Paquier A., Moisy F., Rabaud M.* // Phys. Rev. Fluids. 2016. V. 1. Art. No. 083901.
6. *Kharif C., Abid M.* // J. Mar. Sci. Eng. 2020. V. 8. P. 623.
7. *Плаксина Ю.Ю., Пуштаев А.В., Винниченко Н.А., Уваров А.В.* // Вестн. Моск. ун-та. Физ. и астрон. 2018. № 5. С. 56; *Plaksina Yu.Yu., Pushtaev A.V., Vinnichenko N.A., Uvarov A.V.* // Moscow Univ. Phys. Bull. 2018. V. 73. No. 5. P. 513.
8. *Vinnichenko N.A., Uvarov A.V., Plaksina Yu.Yu.* // Exp. Therm. Fluid Sci. 2014. V. 59. P. 238.
9. *Волков П.Ю., Достовалова К.В., Еречнев Д.А. и др.* // Изв. РАН. Физ. атм. и океана. 2001. Т. 37. № 6. С. 834; *Volkov P.Yu., Dostovalova K.V., Erechnev D.A. et al.* // Izv. Atm. Ocean. Phys. 2001. V. 37. No. 6. P. 769.
10. *Прандтль Л.* Гидроаэромеханика. М.—И.: РХД, 2002.
11. *Новиков Е.А.* // Изв. АН СССР. Физ. атм. и океана. 1981. Т. 17. № 9. С. 956.

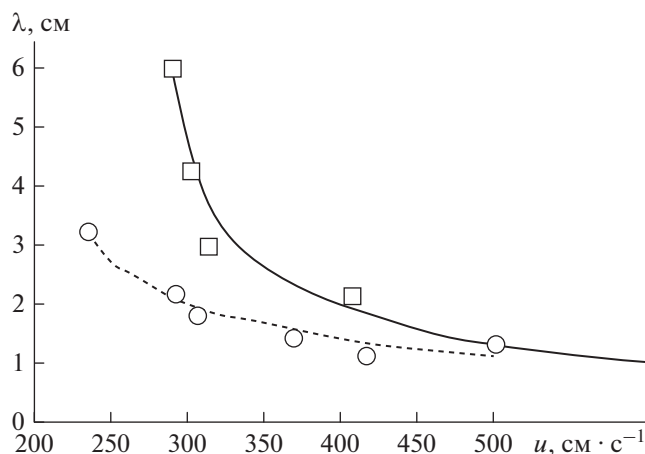


Рис. 3. Резонансная длина волны как функция скорости ветра. Сплошная линия – расчет для свежей водопроводной воды $C_f = 0.08$, квадраты – эксперимент. Штриховая линия – расчет для воды с пленкой, сформировавшейся за 2 сут, $C_f = 0.2$, кружки – эксперимент.

этого значения коэффициента трения при расчетах длины устойчивой резонансной волны для заданной скорости ветра по (1) получено хорошее соответствие экспериментальным данными. На том же графике сплошной линией показана зависимость резонансного значения длины волны, рассчитанной для $C_f = 0.08$, а прямоугольными маркерами – данные экспериментов. Отклонения экспериментальных значений от расчетных кривых лежат внутри доверительного интервала для вероятности 0.67. Отсюда следует, что резонансная зависимость длины волны от скорости ветра определяется коэффициентом трения, причем значение коэффициента трения не зависит от скорости ветра. Коэффициент трения воздушно-го потока о поверхность воды оказывается выше при увеличении концентрации пленки. Можно заключить, что увеличение времени формирования пленки примеси на поверхности воды приводит к изменению длины резонансной волны в зоне генерации: длина резонансной волны уменьшается при увеличении концентрации пленки. Можно определить значение коэффициента трения и соответствующую концентрацию пленки по длине резонансной волны для заданной скорости ветра в исследованном диапазоне значений. Максимальная длина резонансной волны, соответствующая минимальному критическому значению скорости ветра, при которой формируются устойчивые волны на поверхности воды, уменьшается при увеличении концентрации пленки.

12. Мельникова О.Н., Показеев К.В., Ян Х. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 1. С. 134; *Melnikova O.N., Pokazeev K.V., Yang H.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 1. P. 98.
13. Мельникова О.Н., Показеев К.В., Шабров М.Н. // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 1. С. 102; *Melnikova O.N., Pokazeev K.V., Shabrov M.N.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. No. 1. P. 92.

Influence of impurities of low concentration on the generation of wind waves

О. Н. Мельникова^{a, *}, Ю. Ю. Плксина^a, А. В. Уваров^a, Д. А. Агапова^a, Д. И. Иlinykh^a

^a *Department of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119992 Russia*

**e-mail: olamel@yandex.ru*

We consider one of the fundamental problems of the theory of wind wave generation—the existence of a scatter in the critical wind speed, at which stable wind waves appear, the steepness of which increases along the fetch. It has been shown experimentally that one of the reasons for the scatter of the critical wind speed is the presence of a film of low-concentration impurities on the water surface.