

Влияние гидрофобных частиц пыли на параметры ветровых волн в зоне генерации

И.Н. Иванова,^{1,*} О.Н. Мельникова^{1,†}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра физики моря и вод суши
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Поступила в редакцию 10.10.2022; принята к публикации 14.12.2022)

В работе исследуется влияние пленки естественной пыли, осаждаемой из воздуха, на генерацию гравитационно-капиллярных ветровых волн длиной $\lambda < 0.06$ м. Показано, что при увеличении времени осаждения гидрофобных частиц пыли на водную поверхность контактный угол смачивания между поверхностью воды и гидрофобной частицей возрастает, что свидетельствует об увеличении коэффициента поверхностного натяжения. При этом время сближения гидрофобных частиц увеличивается. Обнаружено, что при увеличении концентрации пленки для заданной скорости ветра длина ветровой волны в зоне генерации уменьшается, а крутизна растет, что связано с увеличением шероховатости и коэффициента трения на границе раздела. В зоне генерации возникают нелинейные плоские волны крутизной $0.13 < ak < 0.25$. Получена и проверена методика расчета фазовой скорости таких волн. Критическое значение скорости ветра, при котором начинается генерация ветровых волн, уменьшается при увеличении концентрации пылевой пленки, а значения лежат в интервале $2.3 < U_{min} < 3$ м/с.

PACS: 47.35.-i. УДК: 532.5; 532.6

Ключевые слова: пылевая пленка, угол смачивания, генерация ветровых волн, гравитационно-капиллярные волны, фазовая скорость нелинейных плоских волн.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.78.2330902](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.78.2330902)

ВВЕДЕНИЕ

На границе воздух–вода могут образовываться пленки растворимых и нерастворимых поверхностно-активных веществ, слои мелких твердых частиц, осаждающихся на поверхности воды из воздуха. Если эти частицы гидрофобны, то они собираются в конгломераты, меняя шероховатость поверхности воды, коэффициент трения воздушного потока о поверхность воды и коэффициент поверхностного натяжения. В этом случае поверхность воды состоит из мозаики различных поверхностей, что приводит к увеличению геометрической и физико-химической неоднородностей. Подобные явления, в основе которых лежит действие силы капиллярного притяжения, были предметом изучения более 70 лет в области физики. Капиллярное взаимодействие притягивающихся частиц на поверхности жидкости рассматривается в [1, 2]. Это явление получило название «cheerios–эффект» [3], что связано со знаменитыми одноименными хлопьями, которые имеют тенденцию скапливаться на поверхности молока. Данный механизм агрегации вызывает особый интерес, поскольку подобный эффект обнаруживается в естественных системах [4]. В [5] измерения сил притяжения были проведены на плавающих телах, жестко связанных с чувствительными датчиками. В последнее время исполь-

зуются оптические микроманипуляции для выполнения прямых измерений капиллярных сил между микроскопическими коллоидными частицами на поверхности жидкости [6]. В [7] были представлены прямые измерения капиллярной силы притяжения между парой плавающих макроскопических дисков на границе раздела воздух–вода. Полученные результаты непосредственно сравнивали с результатами численного моделирования, была получена зависимость капиллярной силы притяжения от массы, радиуса дисков и относительного расстояния между ними.

В [8] исследовано изменение вязкоупругости поверхности неподвижного слоя воды при осаждении частиц минеральной пыли размером порядка 10 мкм. Влияние смачиваемости твердого материала оценивалось с помощью измерения контактного угла смачивания водой θ . В эксперименте определяли характеристики естественной пыли и динамику процесса осаждения (поток количества частиц, суточная скорость осаждения и разброс размеров). Контактный угол менялся в диапазоне от 40° до 140° . Внедрение гидрофобных частиц в пленочную структуру морской поверхности увеличило модуль упругости в 1.29–1.58 раз. Можно ожидать, что существенное изменение важнейших параметров поверхности воды при осаждении пыли, таких как шероховатость и поверхностное натяжение, скажется на основных мелкомасштабных динамических процессах и в первую очередь на возбуждении капиллярно-гравитационных волн. Это влияние пыли до сих пор исследовано не было.

* E-mail: ivair@yandex.ru

† E-mail: olamel@yandex.ru

Одной из проблем теории генерации ветровых волн [9] является определение критической скорости ветра, при которой возникают устойчивые волны, амплитуда которых растет вдоль разгона. В [10–12] исследуются генерации малых колебаний водной поверхности длиной порядка микрона, которые фиксируются только в зоне генерации и не становятся устойчивыми волнами. Существующие модели генерации ветровых волн [10–14] дают широкий диапазон значений критической скорости ветра, при которой формируются устойчивые волны. 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.

Целью настоящей работы является исследование влияния пленки естественной пыли, осажденной из воздуха, на генерацию гравитационно–капиллярных ветровых волн длиной $\lambda < 0.06$ м.

1. МЕТОДИКА И АППАРАТУРА

Задача решалась экспериментально в лабораторном ветро–волновом канале кафедры физики моря и вод суши физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Размеры канала $3.5 \times 0.4 \times 0.15$ м. Высота слоя воды составляла 0.3 м, сечение воздушного потока, на входе в канал — 0.15×0.1 м. Воздух подавался через решетку параллельных прямоугольных ячеек сечением 1×1 м⁻², создающих плоскопараллельное течение воздуха на входе в канал. Ветровые волны генерировались горизонтальным ветровым потоком, скорость которого убывала в направлении движения за счет трения о боковые стенки и поверхность воды. Процесс фиксировался на видеозаписи, по которой определялись параметры ветровой волны: длина, амплитуда и фазовая скорость. Запись велась на начальном участке длиной 0.3 м, где появлялись регулярные волны. Скорость записи составляла 25 кадров в секунду. Исследован диапазон скорости ветра $2 < U_{wind} < 7$ м/с.

Влияние параметров пылевой пленки было исследовано в серии из 7 экспериментов в течение 6 дней. Эксперименты проводились раз в сутки. В первый день эксперименты проводились в свежей водопроводной воде. Объем жидкости в канале не менялся, поверхность воды оставалась открытой, что приводило к увеличению концентрации пыли с течением времени. С увеличением концентрации пленки увеличивался коэффициент поверхностного натяжения и коэффициент трения между потоком воздуха и водой.

Для качественной калибровки концентрации пыли на поверхности воды использовались гидрофобные частицы полистирола в виде цилиндров диаметром 2×10^{-3} м и длиной по оси 1.2×10^{-3} м. Частицы помещались в стоячую воду на расстоянии

0.01 м друг от друга вдали от твердых границ. Процесс притяжения частиц под действием капиллярных сил и изменение контактного угла фиксировались в эксперименте. Прямое определение коэффициента поверхностного натяжения выполнялось по характеристикам капиллярных кольцевых волн, возбуждаемых падением малой частицы на поверхность воды на входе в канал.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ

Изменения поверхности воды по мере увеличения времени осаждения пыли продемонстрировано на рис. 1.

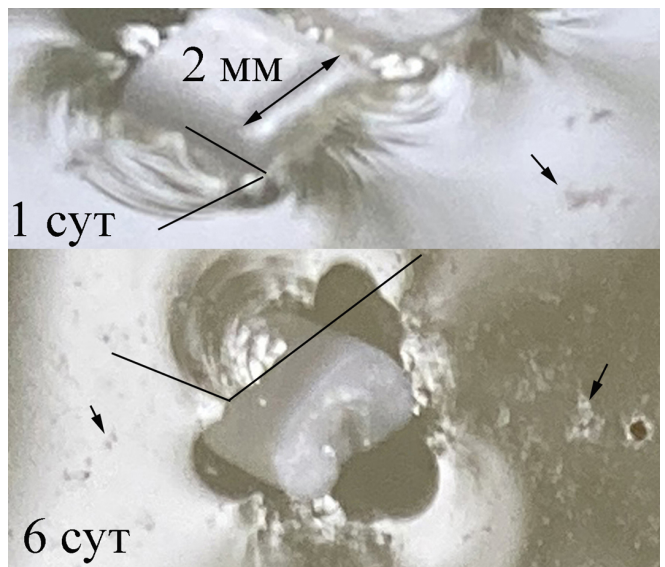


Рис. 1. Гидрофобная частица на неподвижной поверхности воды, время осаждения пыли 1 и 6 сут. Стрелки указывают на скопления пыли. Контактный угол, образованный касательными к поверхностям воды и частицы, меняется от 90° до 110°

На поверхности воды лежит гидрофобная частица из полистирола. Под действием капиллярных сил со стороны искривленной поверхности воды частицы, удаленные друг от друга на расстояние, не превышающее 0.01 м, сближаются. Время сближения до встречи частиц увеличивалось с ростом концентрации пыли. С ростом концентрации пыли увеличивался и контактный угол смачивания гидрофобных частиц с водой. Контактные углы на рис. 1 показаны между прямыми линиями, направленными по касательным к поверхностям. Приведены данные для времени осаждения пыли $T_s = 1$ и 6 сут. Соответствующие контактные углы θ составили 90° и 110° . Известно, что увеличение контактного угла соответствует росту коэффициента поверхностного натяжения [8, 15]. Полученные данные можно проверить с помощью определения коэффициента поверхностного натяжения по параметрам капиллярных кольцевых волн на основе дисперси-

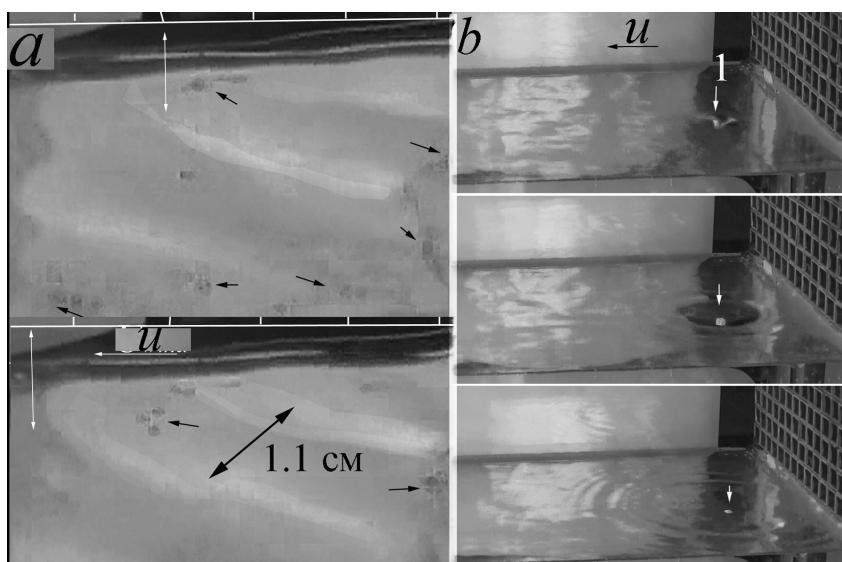


Рис. 2. Поверхность воды в замедляющемся (а) и ускоряющемся (б) потоках воздуха на начальном участке канала

онного соотношения:

$$\sigma = \frac{\rho_w}{k} \left(U_{ex}^2 - \frac{g}{k} \right), \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (1)$$

где ρ_w — плотность воды, g — ускорение силы тяжести, σ — коэффициент поверхностного натяжения, U_{ex} — экспериментальное значение фазовой скорости нелинейной волны. Эта формула справедлива только для волн на неподвижном слое воды. Существует большое число экспериментальных, аналитических и численных исследований [16–19], показавших, что одновременное существование волн и потока жидкости приводит к существенному изменению параметров волн. Именно такая картина характерна для ветровых волн: ветер, помимо волн, за счет вязкости формирует дрейфовое течение на поверхности воды. Однако у входа в канал существует область, в которой дрейфовое течение еще не успевает сформироваться. В соответствии с [20] ветровые волны возникают только в том случае, когда скорость потока воздуха убывает в направлении движения. Если создать ускоряющийся или равномерный поток воздуха в сужающемся канале под наклонной крышей, то ветровые волны не возникнут. В таком потоке на поверхности воды будет развиваться только вязкое дрейфовое течение.

На рис. 2. приведены кадры записей поверхности воды в замедляющемся (а) и ускоряющемся (б) потоках воздуха на начальном участке канала. Ветровые волны существуют только в замедляющемся потоке. В ускоряющемся потоке ветровых волн нет. Приведенные кадры, сделанные через 0.08 с, демонстрируют падение мелкой легкой частицы на поверхность воды при скорости ветра 2.3 м/с. Частица возбуждает капиллярные волны, параметры которых определялись в эксперименте. Частица не смещается вдоль оси канала, что возможно только при отсутствии вязкого дрейфового течения. Полученные данные позволили определить коэффициент поверхностного натяжения для каждо-

го эксперимента серии по формуле (1). На рис. 3 сплошной линией показана зависимость коэффициента поверхностного натяжения от времени осаждения пыли, полученная экспериментально. Данные экспериментов показали, что коэффициент поверхностного натяжения увеличивается с ростом концентрации пыли.

3. ПАРАМЕТРЫ ВЕТРОВЫХ ВОЛН В ЗОНЕ ГЕНЕРАЦИИ

На рис. 2, а приведены последовательные кадры видеозаписи ветровых волн в зоне генерации у входа в канал при воздействии горизонтального потока воздуха, скорость которого составляла $U = 5.2$ м/с. Время осаждения пыли составляло $T_s = 2$ сут. Волны возникают на начальном участке канала в 0.05 м от входа воздушного потока. Ветровая волна является плоской, длина волны $\lambda = 1.1 \times 10^{-2}$ м, высота волны $2a = 8.5 \times 10^{-4}$ м, крутизна $ak = 0.24$. Скорость перемещения гребня $U_{cr} = 0.375$ м/с определялась по смещению фронта волны за интервал времени между кадрами 0.04 с (на кадрах положение фронта волны показан белой стрелкой). Дрейфовая скорость Стокса, измеренная по смещению легкой частицы от кадра к кадру, не превышала 0.002 м/с. Гидрофобная пыль собрана в конгломераты (показаны черными стрелками), пыль остается в зоне генерации у входа в канал в отсутствие развитого дрейфового течения. Этот вывод подтверждают данные, приведенные на рис. 2, б — частица, ставшая источником капиллярной волны, не смещается вдоль оси канала от кадра к кадру. Отсутствие дрейфового течения снимает ряд трудностей с учетом его влияния на параметры ветровой волны.

По данным нескольких серий экспериментов были получены зависимости параметров ветровых волн от времени осаждения пыли и от скорости вет-

ра. На рис. 3 приведены измеренные значения параметров ветровых волн и коэффициента поверхностного натяжения как функция времени осаждения пыли для скорости ветра 3.9 м/с. Из приведенных данных следует, что с увеличением времени осаждения пыли длина волны уменьшается, крутизна волны и фазовая скорость растут. Для объяснения такого поведения параметров волны следует обратиться к механизму генерации волн.

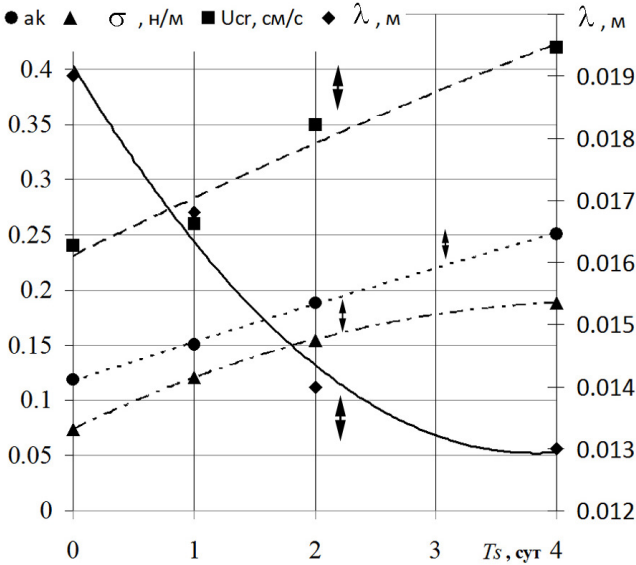


Рис. 3. Экспериментальные зависимости параметров ветровых волн и коэффициента поверхностного натяжения от времени осаждения пыли для скорости ветра 3.9 м/с. Маркеры — экспериментальные значения параметров, линии — линии тренда

В [20] предложен физический механизм генерации волн потоком воздуха, скорость которого убывает в направлении движения. Под действием обратного градиента давления происходит периодический процесс торможения воздуха в пограничном слое потока. В результате возникает деформация вертикального профиля скорости потока, вызывающая потерю устойчивости ламинарного движения [21]. Это приводит к периодическому образованию цепочки цилиндрических вихрей в воздухе у поверхности воды. Горизонтальная ось цилиндров направлена по нормали к продольной координате x . Под вихрями скорость воздуха возрастает, а давление падает, что приводит к синусоидальной деформации поверхности воды. В результате возникает волна, длина которой λ равна расстоянию между вихрями $\lambda = S_{ed}$, а период волны T совпадает с периодом вылета вихрей T_{ed} . Как показано в [20], расстояние между вихрями и период их формирования обратно пропорциональны напряжению трения на границе раздела $\tau = \rho_a C_f u^2$, где u — средняя скорость потока воздуха на нижней границе вязкого слоя, ρ_a — плотность воздуха. В [20] получены выражения для S_{ed} и T_{ed} :

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

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

Здесь C_f — коэффициент трения скольжения воздуха по поверхности воды (безразмерный), u_s — средняя по времени скорость воздушного потока на нижней границе вязкого слоя, δ — толщина вязкого слоя, $u_x = \partial u / \partial x$, где u — средняя скорость потока воздуха на верхней границе вязкого слоя. Параметры ветровых волн должны удовлетворять дисперсионному соотношению поверхностных волн для данного значения коэффициента поверхностного натяжения и данной крутизны нелинейной волны [22]. Резонансное значение длины волны на поверхности воды удовлетворяет и дисперсионному соотношению свободных колебаний, и параметрам вихрей, определяемых соотношением (2) и (3). Только в этом случае колебания свободной поверхности оказывались устойчивыми в эксперименте. Можно предположить, что с ростом концентрации пыли на поверхности воды при одной и той же скорости ветра коэффициент трения C_f растет. Тогда в соответствии с выражениями (2) и (3), S_{ed} и T_{ed} уменьшаются, как и длина λ и период волны T . Для подтверждения этой гипотезы определялись коэффициенты трения по выражениям (2)–(3) и измеренным параметрам ветровых волн в зоне генерации (рис. 3). В расчетах учитывалось, что возникающие волны являются нелинейными. Приведенные данные показывают, что в зоне генерации возникает нелинейные плоские волны крутизной $0.13 < ak < 0.25$. Для заданного коэффициента поверхностного натяжения крутизна волн в зоне генерации растет при увеличении скорости ветра, что связано с увеличением продольного градиента скорости на входе в канал. В [22] было показано, что для чистой воды зависимость фазовой скорости нелинейной плоской волны C_0 от крутизны волны при $ak < 0.3$ можно записать в следующем виде:

$$C_0/C_{lin} = -0.84(ak)^3 + 5.58(ak)^2 - 0.32(ak) + 1, \quad (4)$$

где C_{lin} — фазовая скорость линейной волны той же длины. Сравнение экспериментальных значений фазовой скорости (рис. 3) с расчетом по эмпирическому соотношению (4) показало, что формула (4) хорошо описывает наблюдаемые значения и может быть использована для прогноза процесса генерации для указанного диапазона параметров.

Расчет длины волны на основе [20] показал, что экспериментальное значение длины волны на чистой воде соответствует безразмерному коэффициенту трения $C_f = 0.08$, а при осаждении пыли в течение 2 сут. этот коэффициент возрастает до 0.2. Можно сделать вывод, что длина волны уменьшается, как и предполагалось выше, из-за увеличения силы трения. Крутизна волны растет на фоне уменьшения длины волны (рис. 3).

4. КРИТИЧЕСКАЯ СКОРОСТЬ ВОЗБУЖДЕНИЯ ВЕТРОВЫХ ВОЛН

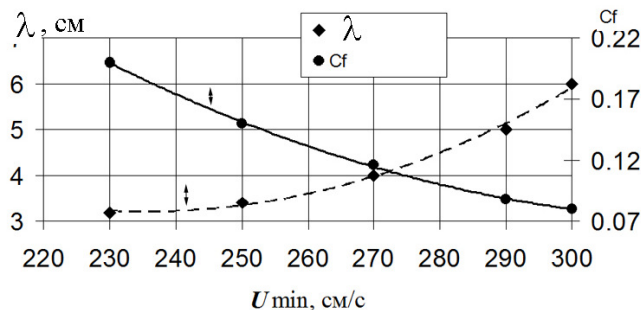


Рис. 4. Зависимости длины резонансной волны и коэффициента трения от критической скорости ветра, при которой возникает генерация ветровой волны

При увеличении коэффициента трения и коэффициента поверхностного натяжения длина волны уменьшается, уменьшается и критическая скорость ветра, при которой начинается генерация ветровых волн. На рис. 4 показано, какая длина волны возникнет на поверхности воды, при критической скорости ветра для заданного значения коэффициента трения. Минимальному значению критической скорости ветра соответствует максимальное значение длины резонансной волны для заданного коэффициента трения (рис. 4). Приведенные данные заключены в интервал значений $2.3 < U_{min} < 3$ м/с. Этот интервал совпадает с разбросом данных, полученных в различных природных условиях [12]. Можно предположить, что в природных условиях на поверхности воды могла присутствовать пленка пыли раз-

личной концентрации, причем диапазон значений концентрации пленки соответствует диапазону изменения этой величины в проведенной серии качественных экспериментов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При увеличении времени осаждения гидрофобных частиц пыли на водную поверхность контактный угол смачивания между поверхностью воды и гидрофобной частицей возрастает, что свидетельствует об увеличении коэффициента поверхностного натяжения. При этом время сближения гидрофобных частиц увеличивается.
2. При увеличении концентрации пленки для заданной скорости ветра длина ветровой волны в зоне генерации уменьшается, а крутизна растет, что связано с увеличением шероховатости и коэффициента трения на границе раздела.
3. В зоне генерации возникают нелинейные плоские волны крутизной $0.13 < ak < 0.25$. Получена и проверена методика расчета фазовой скорости таких волн.
4. Критическое значение скорости ветра, при котором начинается генерация гравитационно-капиллярных ветровых волн, уменьшается при увеличении концентрации пылевой пленки, а значения лежат в интервале $2.3 < U_{min} < 3$ м/с. Этот интервал близок к данным, зафиксированным в различных природных условиях, что подтверждает достоверность полученных результатов.

- [1] Liu I.B., Sharifi-Mood N., Stebe K.J. // *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.* **9**. 283. (2018).
- [2] Liu J., Li S. // *Eur. Phys. J. E.* **42**. 1. (2019).
- [3] Vella D., Mahadevan L. // *Am. J. Phys.* **73**. 817. (2005).
- [4] Peruzzo P., Defina A., Nepf H. M., Stocker R. // *Phys. Rev. Lett.* **111**. 164501. (2013).
- [5] Rieser J.M., Arratia P.E., Yodh A.G., et al. // *Langmuir*. **31**. 2421. (2015).
- [6] Carrasco-Fadanelli, Castillo R. // *Soft Matter*. **15**. 5815. (2019).
- [7] Ho I., Pucci G., Harris D. M. // *Phys. Rev. Lett.* **123**. 254502. (2019).
- [8] Mazurek A. Z., Pogorzelski S. J. // *Int. J. Oceanography*. Article ID 638240. 14. (2012).
- [9] Shemer L. // *Atmosphere*. **10**. 562. (2019).
- [10] Plate E.J., Chang P.C., Hydy G.M. // *J. Fluid Mech.* **35**. No. 4. 625. (2006).
- [11] Liberzon D., Shemer L. // *J. Fluid Mech.* **681**. 462. (2011).
- [12] Cauliez G., Ricci N. Dupont, R. // *Phys. Fluids*. **10**. N 4. 757. (1998).
- [13] Paquier A., Moisy F., Rabaud M. // *Phys. Rev. Fluids*. **1**. 083901. (2016).
- [14] Kharif C., Abid M. // *J. Mar. Sci. Eng.* **8**. 623. (2020).
- [15] Lucassen J. // *Colloids and Surfaces*. 65. N 2-3. 139. (1992).
- [16] Uneyama M. // *Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering*. Asce. **131**. N 5. 203. (2011).
- [17] Toffoli A., Waseda T., Houtani H. et al. // *Phys. Rev.* **87**. 1. (2013).
- [18] Kristiansen T., Faltinsen O.M. // *J. of Fluids and Structures*. **54**. 1. (2015).
- [19] Feng X., Liu J., Ma R. // *Mathematical Problems in Engineering Article ID 8837476*. 26. (2021).
- [20] Мельникова О. Н., Показеев К.В., Шабров М.Н. // *Изв. РАН. Сер. физ.* **81**, № 1. 102. (2017). (Melnikova O.N., Pokazeev K., Shabrov M.N. // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. **81**, N 1. 92.)
- [21] Мельникова О. Н., Ян Х. // *Изв. РАН. Сер. физ.* **86**. № 2. С. 247. (2022). (Melnikova O.N., Yang H. // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. **86**. N 2, 186. (2022).)
- [22] Иванова И. Н., Мельникова О. Н., Показеев К.В., Слизин И.Г. // *Вест. Моск. ун-та.: Физ. Астрон.* № 1. 146. (2012). (Ivanova I.N., Melnikova O.N., Pokazeev K., Snizimov I.G. // *Moscow Univ. Phys. Bull.* **67**, N 1. 143. (2012).)

Influence of Hydrophobic Dust Particles on the Parameters of Wind Waves in the Generation Zone

I.N. Ivanova^a, O.N. Melnikova^b

*Department of Physics of Sea and Inland Water, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia*

E-mail: ^aivair@yandex.ru, ^bolamel@yandex.ru

The article explores the effect of a natural dust film, deposited from the air, on the generation of gravity–capillary wind waves with a wavelength $\lambda < 0.06$ m. It is shown that with an increase in the deposition time of hydrophobic dust particles on the water surface, the contact wetting angle between the water surface and the hydrophobic particle increases, indicating an augmentation in the surface tension coefficient. At the same time, the approach time of hydrophobic particles lengthens. It is found that as the film concentration increases for a given wind speed, the wavelength of the wind wave in the generation zone decreases, while the steepness grows, which is associated with an increase in roughness and the friction coefficient at the interface boundary. Nonlinear plane waves with steepness $0.13 < \alpha < 0.25$ arise in the generation zone. A method for calculating the phase velocity of such waves is obtained and verified. The critical wind speed value at which the generation of wind waves begins decreases with an increase in the concentration of dust film, and the values lie in the interval $2.3 < U_{min} < 3$ m/s.

PACS: 47.35.-i

Keywords: dust film, wetting angle, generation of wind waves, gravitational-capillary waves, phase velocity of nonlinear plane waves.

Received 10 November 2022.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2023. **78**, No. 3. Pp. 410–415.

Сведения об авторах

1. Иванова Ирина Николаевна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: ivair@yandex.ru.
2. Мельникова Ольга Николаевна — доктор физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495) 939-10-46, e-mail: olamel@yandex.ru.