

Дрейфовое течение на поверхности воды с пленкой гидрофобных частиц в равномерном и замедляющемся потоках воздуха

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 22.03.2023; после доработки 26.04.2023; принята к публикации 22.05.2023)

Исследуется влияние пленки гидрофобных частиц пыли на поверхности воды на развитие дрейфового течения под действием ветра. В равномерном потоке воздуха на плоской поверхности воды дрейфовое течение обусловлено силами вязкости, возрастает вдоль разгона. Обнаружено формирование стационарных волн на дрейфовом течении, если скорость дрейфа $U_{dr} > 0.23$ м/с. В замедляющемся потоке воздуха при наличии ветровых волн суммарная составляющая дрейфовой скорости U_{sum} циклически возрастает и падает до вязкой составляющей при распаде крутой ветровой волны на более длинные линейные волны. При увеличении времени осаждения частиц T_s максимум отношения волновой части дрейфовой скорости к суммарной U_w/U_{sum} убывает от 0.6 для чистой воды до 0.3 для $T_s = 4$ суток.

PACS: 47.35.-i. УДК: 532.5; 532.6

Ключевые слова: дрейфовая скорость, пылевая пленка, генерация ветровых волн, гравитационно-капиллярные волны, стационарные волны.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.78.2340902](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.78.2340902)

ВВЕДЕНИЕ

Прогноз перемещения плавучих объектов, загрязнений и поверхностно-активных веществ, дрейфующих на поверхности океана, является важной задачей. Атмосферный перенос и осаждение минеральных частиц на поверхность воды сильно влияют на параметры сред на поверхности раздела. В отличие от пленок поверхностно-активных веществ, которые увеличивают эластичность поверхности, снижая коэффициент поверхностного натяжения, пыль, наоборот, увеличивает его. Внедрение гидрофобных частиц в пленочную структуру морской поверхности увеличивает модуль упругости в 1.3–1.6 раза [1]. При выпадении твердых гидрофобных мелких частиц из воздуха на поверхности воды формируются неоднородные пленки, меняющие поверхностное натяжение и коэффициент трения потока воздуха о воду. Неоднородность пленок обусловлена формированием конгломератов, возникающих при капиллярном взаимодействии гидрофобных частиц [2–4]. Данный механизм агрегации обнаруживается в натуральных условиях [5], влияя на процессы переноса примесей ветровым дрейфовым течением.

Ветровое дрейфовое течение состоит из двух составляющих: чисто волнового дрейфа, связанного с взаимодействием нелинейных волн, и ветрового сдвигового течения [6], обусловленного действием

сил вязкости. Результаты многочисленных экспериментальных исследований, посвященных определению относительного вклада этих компонент в общее дрейфовое течение, сильно отличаются друг от друга. В работе [6] волновая скорость составляет примерно 2/3 от общей скорости дрейфа, а в работе [7] — только 1/3. Значительное отличие данных могло быть обусловлено наличием различных поверхностных пленок, в том числе и пленки естественной пыли. Проверке этого предположения посвящено настоящее исследование.

Цель настоящей работы — изучение влияния нерастворимой поверхностной пленки гидрофобных частиц естественной пыли на развитие ветрового дрейфового течения, оценка вклада волнового и вязкого дрейфа в дрейфовую скорость при наличии пленки. Задача решалась экспериментально.

1. МЕТОДИКА И АППАРАТУРА

Эксперименты проводились в прямом канале из прозрачного оргстекла на кафедре физики моря и вод суши физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Длина канала — 3.5 м, ширина смачиваемой области — 0.15 м, толщина слоя воды 0.3 м. На выходе канал имеет расширение в форме прямоугольника размером 0.48×0.22 м⁻², которое обеспечивает гашение волн. Большая сторона прямоугольника перпендикулярна каналу. На входе ветрового потока в канал установлена решетка параллельных прямоугольных ячеек сечением 1×1 м⁻², длиной 0.03 м. Решетка формировала плоскопараллельное течение воздушного потока на на-

* E-mail: ivair@yandex.ru

† E-mail: olamel@yandex.ru

чальном участке канала. Высота решетки составляла 0.1 м, ширина — 0.15 м. Ряд экспериментов выполнялся в открытом канале, другой ряд — в канале с наклонной крышей.

Волновая поверхность воды фиксировалась видеокамерой HDR-XR550E, с частотой записи 25 кадров в секунду. Скорость потока воды определялась по смещению частиц нейтральной плавучести от кадра к кадру видеозаписи. Скорость воздушного потока на рабочем участке измерялась с помощью анемометра. Измерения проводились при значениях скорости ветра на входе в канал от 2.35 м/с до 4 м/с. В экспериментах определялись параметры ветровых волн, распределение дрейфовой скорости вдоль канала. Коэффициент поверхностного натяжения оценивался по фазовой скорости кольцевых волн, возникающих на поверхности неподвижной воды при падении маленькой частицы. Коэффициент поверхностного натяжения определяется дисперсионным соотношением:

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

где ρ_w — плотность воды, g — ускорение силы тяжести, σ — коэффициент поверхностного натяжения, U_{ex} — экспериментальное значение фазовой скорости кольцевой волны.

Влияние пленки пыли на характеристики ветрового дрейфа исследовалось в серии экспериментов, проводимых ежедневно — один раз в сутки в течение 4 суток. Вода в канале не менялась, в результате на поверхности воды концентрация частиц пыли увеличивалась за счет осаждения частиц пыли из воздуха.

2. ВЯЗКАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ СКОРОСТИ ДРЕЙФОВОГО ТЕЧЕНИЯ В РАВНОМЕРНОМ ПОТОКЕ ВОЗДУХА (КАНАЛ С НАКЛОННОЙ КРЫШЕЙ)

Во многих экспериментальных, аналитических и численных исследованиях [8–11] показано, что одновременное существование волн и потока жидкости приводит к существенному изменению параметров волн и поверхностных течений. Именно такая картина характерна для ветровых волн: ветер создает дрейфовое поверхностное течение и генерирует волны. Пока волны линейны (имеют малую крутизну $ak < 0.1$, где a — амплитуда волны, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ — волновое число), они не создают смещения жидкости в направлении потока воздуха. В этом случае дрейфовое течение на поверхности воды формируется только за счет сил вязкости. Однако крутизна ветровых волн быстро растет вдоль разгона, формируются нелинейные волны, которые дают дополнительный вклад в смещение единичного объема жидкости в направлении движения волны. Это не позволяет экспериментально оценить отдельно волновую и вязкую составляющие дрейфовой скорости в зоне волн большой крутизны.

В соответствии с [12] ветровые волны возникают только в том случае, когда скорость потока воздуха убывает в направлении движения. Если создать ускоряющийся или равномерный поток воздуха, то в таком потоке на поверхности воды ветровые волны не возникнут — будет развиваться только вязкое дрейфовое течение. В настоящем исследовании ускоряющийся или равномерный поток воздуха формировался в сужающемся канале под наклонной крышей. Экспериментально показано, что в равномерном (ускоряющемся) потоке воздуха вязкая составляющая дрейфовой скорости на гладкой поверхности чистой воды растет с увеличением скорости ветра и определяется выражением [13]:

$$\frac{U_{dr}}{u} = \left(1,33 + \frac{\mu_w \delta_a}{\mu_a \delta_w} \right)^{-1}, \quad (2)$$

где U_{dr} — дрейфовая скорость, u — скорость потока воздуха, μ_w , μ_a — вязкость воды и воздуха, δ_w , δ_a — толщина вязкого слоя воды и воздуха. Эмпирическое выражение (2) с учетом результатов [13] позволяет рассчитать скорость вязкого дрейфа для установившегося течения на чистой воде.

На рис. 1 приведены зависимости дрейфовой скорости течения в канале под крышей от разгона x (расстояния от начала канала). Штриховая линия аппроксимирует данные, полученным при $u = 2.35$ м/с. Маркеры (прямоугольники светлые и закрашенные) на рисунке соответствуют времени осаждения пыли $T_s = 1$ и 4 сут. При этой скорости ветра скорость дрейфового течения монотонно растет вдоль разгона и достигает максимального значения $U_{dr} = 0.05$ м/с при $x > 0.3$ м (в однородной части продольного профиля). Это значение соответствует расчету по (2) для чистой воды в условиях эксперимента. При наличии пленки пыли экспериментальные данные следуют той же аппроксимирующей линии в пределах доверительного интервала для вероятности 0.67. Это позволяет заключить, что при такой скорости ветра пленка пыли не влияет на дрейфовую скорость, а максимальное значение скорости может быть рассчитано по (2).

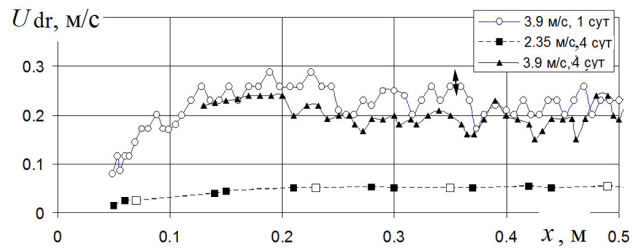


Рис. 1. Зависимость дрейфовой скорости от разгона в равномерном потоке воздуха в канале с крышей. Прямоугольники светлые и закрашенные соответствуют времени осаждения пыли $T_s = 1$ и 4 сут. Стрелка — доверительный интервал для вероятности 0.67

Для скорости ветра 3.9 м/с зависимость дрейфовой скорости от x не является монотонной: функ-

ция $U_{dr}(x)$ имеет максимум при $x = 0.22$ м (рис. 1). В этой же зоне на поверхности воды появляются стационарные синусоидальные волны. На рис. 2, *a* приведен кадр, полученный в канале с наклонной крышей для скорости ветра 3.9 м/с и $T_s = 4$ сут. Наклон крыши подобран так, что скорость воздушного потока не меняется в направлении движения. Ветровые волны в этих условиях не возникают, но появляются стационарные волны при выполнении двух условий: скорость течения должна меняться в направлении движения и превышать критическое значение 0.23 м/с [14]. Гребни волн не перемещаются, так как волны бегут навстречу потоку жидкости с фазовой скоростью, равной скорости самого потока. В соответствии с дисперсионным соотношением фазовая скорость волн имеет минимальное значение 0.23 м/с, соответствующее длине волны 0.017 м. Если скорость течения ниже этого значения, то стационарные волны не возникают. В соответствии с данными рис. 1 и рис. 2, *a* стационарные волны появляются при $x = 0.22$ м, где $U_{dr} > 0.23$ м/с. Появление стационарных волн приводит к снижению скорости дрейфового течения примерно на 20%.

Можно предположить, что снижение обусловлено затратами энергии потока на формирование стационарных волн. Энергия волн пропорциональна квадрату амплитуды, а для стационарных волн амплитуда пропорциональна $\partial U_{dr}/\partial x$ [14]. Последний параметр растет с увеличением шероховатости водной поверхности, усиливая стационарную волну и увеличивая подавление вязкого дрейфа. Согласно рис. 1, там, где $U_{dr} < 0.23$ м/с и стационарных волн нет, данные, полученные для времени осаждения 1 и 4 су, не отличаются. В зоне стационарных волн дрейфовая скорость, зафиксированная для $T_s = 4$ суток, оказалась ниже, чем для одних суток, что подтверждает сделанное предположение. Следует отметить, что стационарные волны на потоке жидкости были изучены ранее [14, 15], однако стационарные волны на ветровом дрейфовом течении ранее не исследовались.

3. ДРЕЙФОВАЯ СКОРОСТЬ ПРИ НАЛИЧИИ ВЕТРОВЫХ ВОЛН В ЗАМЕДЛЯЮЩЕМСЯ ПОТОКЕ ВОЗДУХА (КАНАЛ БЕЗ КРЫШИ)

В канале без крыши формируется замедляющийся в направлении движения поток воздуха за счет торможения о вертикальные стенки и поверхность воды. В ближней зоне у входа в канал происходит генерация коротких волн малой амплитуды. Под действием потока воздуха происходит усиление волн, растет их крутизна ak (рис. 2, *б*). В [16] исследовано усиление ветровых волн ветром вдоль разгона, показано, что при достижении крутизны волны $ak = 0.31$ происходит распад крутой волны на более длинные линейные волны. На рис. 3 приведены зависимости дрейфовой скорости от разгона, полученные в экспериментах, проведенных в од-

нородном и замедляющемся потоках воздуха при одной и той же скорости ветра на входе в канал $U = 3.9$ м/с. Вязкая составляющая $U_{dr}(x)$ получена на гладкой поверхности воды, суммарная составляющая $U_{sum}(x)$ — при наличии ветровых волн. Суммарная составляющая включает как вязкий, так и волновой вклад дрейфовой скорости. На начальном участке $x < 0.1$ м крутизна волн мала $ak \approx 0.1$, скорость суммарного дрейфового течения отличается от вязкой составляющей в пределах доверительного интервала (доверительная вероятность 0.67). На участке $0.1 < x < 0.25$ м крутизна волны увеличивается до значения $ak \approx 0.2$, а суммарная скорость дрейфового течения U_{sum} оказывается ниже вязкой составляющей. Уменьшение суммарной скорости дрейфового течения ниже скорости вязкого дрейфа может быть обусловлено нарушением ламинарного обтекания волны воздушным потоком. На переднем склоне волны сечение потока воздуха увеличивается вдоль разгона, а скорость, соответственно, падает. В таком замедляющемся потоке у границы вязкого слоя периодически формируются цилиндрические вихри, нарушающие устойчивость ламинарного движения в пограничном слое [17], что приводит к уменьшению вязкой составляющей скорости на переднем склоне волны [18]. Снижение суммарной дрейфовой скорости относительно вязкой составляющей на этом участке (рис. 3) составляет примерно 0.05 м/с, или 20% от скорости вязкого дрейфа. Чисто волновая скорость дрейфа для слабо нелинейной волны крутизны $ak < 0.2$ может быть оценена приближением Стокса [19, 20]:

$$U_w = (ak)^2 \sqrt{g/k}, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (3)$$

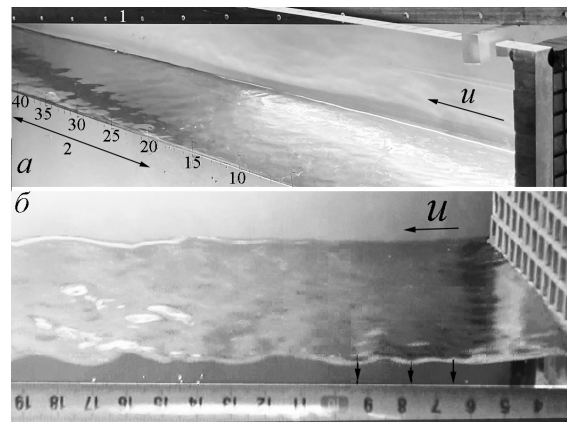


Рис. 2. Поверхность воды в равномерном (*a*) и замедляющемся (*б*) потоках воздуха на начальном участке канала

Для длины волны $\lambda = 0.02$ м волновая часть дрейфовой скорости $U_w = 0.007$ м/с, что составляет примерно 3% от суммарной скорости дрейфа. Волновой вклад мал по сравнению со снижением вязкой составляющей дрейфовой скорости, обусловленным образованием вихрей.

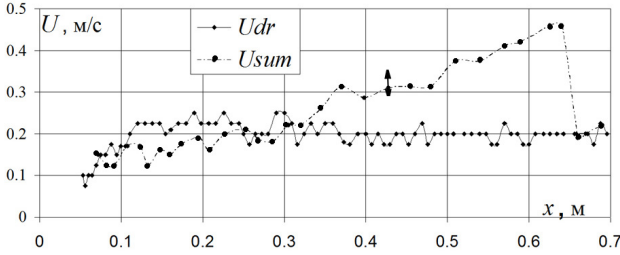


Рис. 3. Зависимость дрейфовой скорости от разгона в равномерном и замедляющемся потоках воздуха. Чистая вода. Стрелка — доверительный интервал для вероятности 0.67

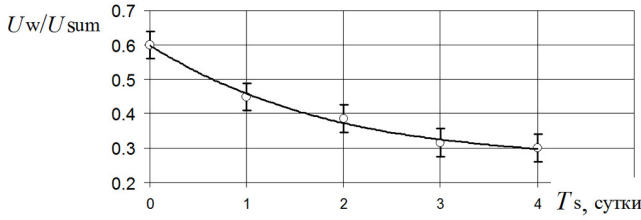


Рис. 4. Изменение волновой составляющей дрейфовой скорости, отнесенной к суммарной составляющей, от времени осаждения пыли. Сплошная линия — линия тренда

На участке $0.25 < x < 0.55$ крутизна волны возрастает до критического значения 0.31, при котором происходит распад крутой волны на линейные волны. Суммарная дрейфовая скорость максимальна перед распадом волны. Сразу после распада она падает до значения скорости вязкого дрейфа. Быстрый рост суммарной составляющей дрейфовой скорости связан с увеличением волновой составляющей, обусловленной ростом крутизны волны [20]. Кроме того, растет вклад и вязкой составляющей. Как показано в [16], при усилении нелинейной ветровой волны передний склон становится короче. Это приводит к сокращению участка поверхности воды, где формируются вихри, разрушающие ламинарное течение в вязком слое. Дополнительный рост вязкого вклада связан с увеличением крутизны волны при увеличении времени осаждения пленки. Если суммарная составляющая $U_{sum} = U_w + U_{dr}$, то отношение волновой составляющей к суммарной можно записать:

$$\frac{U_w}{U_{sum}} = 1 - \frac{U_{dr}}{U_{sum}}. \quad (4)$$

В соответствии с данными рис. 3 на чистой воде $U_{sum} = 0.47$ м/с перед распадом волны, а $U_{dr} = 0.2$ м/с. Тогда максимальное значение отношения $\frac{U_w}{U_{sum}} = 0.6$ близко данным работы [6].

Эксперименты показали, что с увеличением времени осаждения пыли T_s отношение вязкой дрейфовой скорости к суммарной составляющей растет, а волновой составляющей к суммарной убывает

(рис. 4). Для $T_s = 4$ суток $\frac{U_w}{U_{sum}} = 0.3$, что близко данным работы [7]. Можно предположить, что в этой работе на поверхности воды существовала пылевая пленка, осажденная за несколько суток.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В равномерном потоке воздуха на плоской поверхности воды скорость дрейфового течения на чистой воде и при наличии пленки пыли монотонно растет вдоль разгона, при условии $U_{dr} < 0.23$ м/с. Максимальное значение скорости может быть рассчитано по (2). Если скорость дрейфового течения меняется вдоль разгона и $U_{dr} > 0.23$ м/с, на поверхности воды возникают синусоидальные стационарные волны (волны с неподвижными гребнями), фазовая скорость которых равна скорости дрейфового течения с обратным знаком. Появление стационарных волн обуславливает снижение дрейфовой скорости на поверхности воды на 20%.
2. С увеличением времени осаждения пыли T_s в равномерном потоке воздуха дрейфовая скорость в зоне стационарных волн снижается, так как амплитуда волн увеличивается пропорционально параметру $\partial U_{dr}/\partial x$, который растет с увеличением шероховатости поверхности воды.
3. В замедляющемся потоке воздуха на поверхности воды возникают ветровые волны, крутизна которых растет вдоль разгона, достигает критического значения, при котором волна распадается на более длинные линейные волны. При малой крутизне волны $ak \approx 0.1$ $U_{sum} \approx U_{dr}$, так как вклад волновой составляющей очень мал. Для $ak \approx 0.2$ $U_{sum} < U_{dr}$, что связано с нарушением ламинарного обтекания переднего склона волны и с уменьшением вязкой составляющей дрейфовой скорости. С дальнейшим ростом крутизны волны суммарная составляющая быстро растет за счет волновой составляющей, а после распада волны уменьшается до вязкой составляющей.
4. При увеличении времени осаждения пыли T_s в замедляющемся потоке воздуха длина волны в зоне генерации уменьшается, а крутизна растет. Критическое значение крутизны волны достигается на более коротком участке, сокращается и зона потерь U_{dr} на переднем склоне волны. В результате с увеличением T_s отношение максимального значения вязкой составляющей скорости к суммарной U_{dr}/U_{sum} растет, а волновой составляющей к суммарной U_w/U_{sum} убывает. Этот результат соответствует данным натурных наблюдений [6, 7].

Следует отметить, что полученные результаты имеют качественный характер, так как в работе не обсуждается вопрос изменения параметров пленки под влиянием ветра и поверхностного дрейфа.

- [1] Mazurek A.Z., Pogorzelski S.J. // *Int. J. Oceanogr.* **638240**. (2012).
- [2] Liu I.B., Sharifi-Mood N., Stebe K.J. // *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.* **9**. 283. (2018).
- [3] Liu J., Li S. // *Eur. Phys. J. E.* **42**. 1. (2019).
- [4] Vella D., Mahadevan L. // *Am. J. Phys.* **73**. 817. (2005).
- [5] Peruzzo P., Defina A., Nepf H.M., Stocker R. // *Phys. Rev. Lett.* **111**. 164501. (2013). <http://dx.doi.org/>
- [6] Wu J. // *J. Phys. Oceanogr.* **13**. 1441. (1983).
- [7] Ardhuin F. et al. // *J. Phys. Oceanogr.* **39**. 2820. (2009).
- [8] Umeяama M. // *J. of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering Asce.* **131**. N 5. 203. (2011).
- [9] Toffoli A., Waseda T., Houtani H. et al. // *Phys. Rev.* **87**. 1. (2013).
- [10] Kristiansen T., Faltinsen O.M. // *J. of Fluids and Structures.* **54**. 1. (2015).
- [11] Feng X., Liu J., Ma R. // *Mathematical Problems in Engineering.* 8837476. (2021).
- [12] Мельникова О.Н., Показеев К.В., Шабров М.Н. // *Изв. РАН. Сер. физ.* **81**. № 1. 102. (2017). (Mel'nikova O.N., Pokazeev K., Shabrov M.N. // *Bull. of the RAS: Physics.* **81**, N 1. 92. (2017).)
- [13] Мельникова О.Н., Показеев К.В., Рожновская А.А. // *Изв. РАН. Сер. физ.* **76**. № 12. 1515. (2012). (Mel'nikova O.N., Pokazeev K., Rozhnovskaya A.A. // *Bull. of the RAS: Physics.* **76**, N 12. 1357. (2012).)
- [14] Лайтхилл Дж. Волны в жидкости. М.: Мир. 1981.
- [15] Иванова И.Н., Мельникова О.Н., Штеренлихт Д.В. // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* **32**, № 1. 141. (1996).
- [16] Иванова И.Н., Мельникова О.Н., Показеев К.В., Снлизин И.Г. // *Вест. Моск. ун-та.: Физ. Астрон.* № 1. 146. (2012). (Ivanova I.N., Mel'nikova O.N., Pokazeev K., Snizinov I.G. // *Moscow Univ. Phys. Bull.* **67**, N 1. 143. (2012).)
- [17] Мельникова О.Н., Ян Х. // *Изв. РАН. Сер. физ.* **86**. № 2. 247. (2022). (Mel'nikova O.N., Yang H. // *Bull. of the RAS: Physics.* **86**, N 2. 186. (2022).)
- [18] Мельникова О.Н., Показеев К.В., Рожновская А.А. // *Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон.* **68**, № 4. 55. (2013). (Mel'nikova O.N., Pokazeev K., Rozhnovskaya A.A. // *Moscow Univ. Phys. Bull.* **67**, N 4. 320. (2013).)
- [19] Ламб Г. Гидродинамика. Ижевск, НИЦ РХД. (2003).
- [20] Andrew D., McIntyre M. // *J. of Fluid Mech.* **89**, N 4. 609. (1978).

Drift current on water surface with a film of hydrophobic particles under uniform and decelerating airflow conditions

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 effect of a film of hydrophobic dust particles on the water surface on the development of a drift current under the influence of wind is studied. In a uniform air flow on a flat water surface, the drift current is caused by viscous forces and increases along the fetch. The formation of stationary waves on a drift current is found if the drift velocity is $U_{dr} > 0.23$ m/s. In a decelerating air flow in the presence of wind waves, the total component of the drift velocity U_{sum} cyclically increases and drops to a viscous component when a steep wind wave breaks up into longer linear waves. As the particle settling time T_s increases, the maximum ratio U_w/U_{sum} decreases from 0.6 for pure water to 0.3 for $T_s = 4$ days

PACS: 47.35.-i

Keywords: drift velocity, dust film, generation of wind waves, gravitational-capillary waves, stationary waves.

Received 22 March 2023.

English version: *Moscow University Physics Bulletin.* 2023. **78**, No. 4. Pp. 578-583.

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; e-mail: olamel@yandex.ru.