

УДК 551.463.8

© И. А. Исаченко<sup>1,2\*</sup>, И. М. Краев<sup>1</sup>, Д. А. Сергеев<sup>1</sup>, 2023

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук», 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46.

<sup>2</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва, Нахимовский пр-т, д. 36

\*isatchenko@gmail.com

## ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ВОЛНЕНИЯ НА ОСЕДАНИЕ И ДРЕЙФ ЧАСТИЦ МИКРОПЛАСТИКА: ЛАБОРАТОРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Статья поступила в редакцию 14.03.2023, после доработки 18.10.2023, принята в печать 30.11.2023

### Аннотация

Исследованы траектории и средние скорости оседания и дрейфа частиц микропластика под воздействием поверхностных гравитационных волн и течения в жидкости конечной глубины. Эксперименты проводились в линейном ветроволновом канале, в котором создавались различные условия волнопродуктором и воздействием воздушного потока на поверхность воды. Использовались частицы различной формы (изометрические, плоские, сферические). В работе приводится краткое описание основанных на анализе размерностей подходов, применяемых при исследовании переноса микропластика в условиях поверхностного волнения. На основе этого дается характеристика режимов волнения и наборов экспериментальных частиц. Частицы имеют конечные скорости оседания в неподвижной жидкости в диапазоне 1,0–3,8 см/с. Значения конечных скоростей оседания в неподвижной жидкости получены экспериментально и могут представлять самостоятельный интерес. Получены и проанализированы траектории оседания 13-ти типов частиц в четырех режимах волнения. Средняя скорость оседания частиц в присутствии волн слабо отличается (по  $t$ -критерию Уэлча с условием  $p < 0,05$ ) от конечной скорости оседания в неподвижной жидкости, что согласуется с другими работами. Результаты указывают на то, что средняя горизонтальная скорость (дрейфа) следует средней скорости течения. Присутствие ветра усиливает горизонтальный перенос из-за усиления дрейфового течения и резко увеличивает дисперсию частиц.

**Ключевые слова:** микропластик, лабораторный эксперимент, поверхностные гравитационные волны, ветровые волны, скорость оседания, скорость дрейфа, лагранжев период, дисперсия частиц

© И. А. Исаченко<sup>1,2\*</sup>, И. М. Краев<sup>1</sup>, Д. А. Сергеев<sup>1</sup>, 2023

<sup>1</sup>Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, 46 Ulyanova Street, Nizhny Novgorod, 603950, Russia

<sup>2</sup>Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36 Nakhimovsky Prosp., Moscow, 117997, Russia

\*isatchenko@gmail.com

## EFFECT OF SURFACE WAVES ON SETTLING AND DRIFTING OF MICROPLASTIC PARTICLES: A LABORATORY EXPERIMENT

Received 14.03.2023, Revised 18.10.2023, Accepted 30.11.2023

### Abstract

Particle trajectories and average settling and drift velocities of microplastic particles under wave action were studied in a linear wind-wave channel. A wave-maker and an airflow above the water surface created various hydrodynamic conditions. Particles of various shapes (isometric, flat, elongated) were used. The paper provides a brief overview of the theoretical approaches (dimensional analysis) used to study the transport of microplastics in the presence of surface waves and currents. Based on this, a characteristic of wave regimes and sets of experimental particles is given. Terminal settling velocities of the particles in a quiet fluid are 1.0–3.8 cm/s. They were obtained experimentally and may be of independent interest. The settling trajectories of 13 types of

Ссылка для цитирования: Исаченко И.А., Краев И.М., Сергеев Д.А. Влияние поверхностного волнения на оседание и дрейф частиц микропластика: лабораторный эксперимент // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2023. Т. 16, № 4. С. 32–44. doi:10.59887/2073-6673.2023.16(4)-3

For citation: Isachenko I.A., Kraev I.M., Sergeev D.A. Effect of Surface Waves on Settling and Drifting of Microplastic Particles: A Laboratory Experiment. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2023, 16, 4, 32–44. doi:10.59887/2073-6673.2023.16(4)-3

particles in 4 wave regimes were obtained and analyzed. According to Welch's  $t$ -criterion ( $p < 0.05$ ), the average particle settling rate in the presence of waves differs slightly from the terminal settling velocity, which is consistent with other works. The results indicate that the average horizontal (drift) velocity follows the velocity of the mean current. The presence of wind enhances horizontal transport due to the induction of drift current and drastically increases particle dispersion.

**Keywords:** microplastics, surface gravity waves, wind waves, settling rate, drift velocity, excess Lagrangian period, particle dispersion

## 1. Введение

На сегодняшний день является общепризнанной проблема загрязнения вод Мирового океана частицами микропластика (МП,  $< 5$  мм), угрожающими здоровью человека и равновесию экосистем. Существенным источником морского МП является постепенное разрушение крупных фрагментов пластикового мусора, а также частей береговых сооружений с образованием так называемого вторичного МП. Эффективным механизмом образования вторичного МП может быть механическое истирание осадками и фрагментация в зоне набегания и обрушения волн, особенно в штормовых условиях. Таким образом, наряду с изучением непосредственно механизмов фрагментации пластика, актуальной проблемой является теоретическое описание и моделирование потоков МП в, из и внутри прибрежной зоны моря. Сложность исследования данной проблемы связана, среди прочего, с тем, что перенос МП в прибрежной зоне морей и океанов, как и других частиц, определяется воздействием множества факторов, таких как поверхностные волны, течения, колебания уровня моря, турбулентность, ориентация береговой линии к направлениям ветра и подхода волн и др. Параметры самих частиц также играют немалую роль. Так, в условиях интенсивного ветрового перемешивания в приповерхностном слое частицы с различной скоростью всплытия в среднем оказываются на различной глубине [1]. Вместе с тем скорость стокового дрейфа в самом верхнем слое выше, чем в более глубоких слоях, поэтому более крупные частицы мезопластика могут переноситься в сторону берега эффективнее, чем МП [2]. Результаты численного моделирования переноса водорослей в прибрежной зоне показали [3], что существенным фактором для выброса на берег как изначально плавучих, так и тонущих частиц, является включение в расчет увеличения скорости оседания частиц под действием турбулентности [4]. Лабораторные эксперименты [5–6] указывают на изменение скорости оседания МП под действием поверхностных гравитационных волн. Таким образом, выявление закономерностей влияния различных факторов, в том числе параметров поверхностного волнения, на процесс оседания частиц МП в жидкости конечной глубины будет способствовать более полному описанию транспорта и аккумуляции МП в прибрежной зоне.

Лабораторные исследования показывают, что скорость оседания частиц МП различной формы (сферы, цилиндры, диски) может меняться под действием поверхностного волнения как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения в зависимости от числа Рейнольдса частиц и их формы [5]. Так, сферы (диаметр 3 мм, удельная плотность  $\rho_p/\rho_f = 1,02$ ) оседали быстрее, чем в спокойной жидкости (2,6 см/с); диски (диаметр 7 мм, высота 1,2 мм,  $\rho_p/\rho_f = 1,005$ ) оседали приблизительно с той же скоростью, что и в спокойной жидкости (0,9 см/с) вплоть до некоторого числа Рейнольдса и быстрее после; цилиндры (диаметр 0,9 мм, высота 6,8 мм,  $\rho_p/\rho_f = 1,01$ ) оседали медленнее, чем в спокойной жидкости (0,9 см/с) при малых числах Рейнольдса, и быстрее при больших. Увеличение скорости оседания более мелких сферических частиц (диаметр 0,15–0,64 мм,  $\rho_p/\rho_f = 1,2$ ) в условиях волнения по отношению к скорости оседания в спокойной жидкости (0,5–1,7 см/с) также было зафиксировано в экспериментах [6]. Оседание на дно частиц МП различных размеров и форм (диски, длинные цилиндры и изометрические цилиндры, с размером в диапазоне 1–7 мм), в условиях одновременного действия поверхностных волн и течения, исследовались в экспериментах Кларк с соавторами [7]. Была проанализирована эффективность рассеивания частиц, отпускаемых из фиксированной точки под поверхностью воды, в толще воды волнением и течением на основе регистрации точек касания ими дна и показано, что при наличии волнения частицы рассеиваются сильнее, и это нельзя объяснить одним лишь влиянием увеличенной дистанции дрейфа на пространственную неоднородность точек касания. Модификация поля волнения и течений под воздействием ветра может также повлиять на транспорт МП, однако наблюдение за МП в этих условиях сопряжено со значительными трудностями, и на данный момент в литературе представлены только качественные результаты исследования зон накопления МП в прибрежной зоне под воздействием волн и ветра [8].

Цель данной работы заключалась в изучении влияния волн на процесс оседания и дрейфа МП, а именно: описание характера оседания МП на качественном уровне при различных условиях поверхностного волнения и измерение средней скорости частиц. Для этого были проведены лабораторные эксперименты, в ходе которых отслеживались траектории оседания частиц МП в различных гидродинамических условиях, создаваемых в гидродинамическом канале как за счет одного только волнопродуктора с различной частотой

колебаний, так и при совместном действии волнопродуктора и воздушного потока. Впервые выполнены лабораторные измерения скоростей частиц МП, оседающих в условиях нерегулярного волнения (в т.ч. с обрушением), модифицированного воздействием ветра над поверхностью воды. Результаты могут быть использованы при разработке численных моделей переноса МП.

## 2. Характерные масштабы и безразмерные числа для описания процесса переноса МП в условиях волнения

Рассматривается процесс оседания частиц разной (несферической) формы в условиях поверхностного волнения в жидкости конечной глубины при наличии среднего течения и ветра. Предполагается, что частицы инерционные, т.е. характерное время их приспособления к изменению скорости жидкости ( $\tau_p$ , с) конечно и не может считаться пренебрежимо малым. Взаимное влияние частиц не учитывается, поскольку предполагается достаточно малая концентрация частиц в жидкости, как это обычно характерно для МП в водной толще и у поверхности. Исследуемыми (определяемыми) величинами являются средняя скорость оседания и скорость дрейфа частицы. В табл. 1 приводится список основных определяющих параметров задачи. Размер частиц характеризуется эквивалентным сферическим диаметром ( $D_p$ , м), определяемым как диаметр сферы того же объема, что и рассматриваемая частица, и может быть вычислен согласно выражению:

$$D_p = (6/\pi)^{1/3}(d_a d_b d_c)^{1/3}, \quad (1)$$

где  $d_a$ ,  $d_b$  и  $d_c$  — наибольший, средний и наименьший размер частицы (м), если все экспериментальные частицы приближенно являются прямоугольными параллелепипедами.

Размер и плотность частицы влияют на  $\tau_p$ . Они вместе с формой частицы и параметрами жидкой среды определяют ее скорость оседания в спокойной жидкости ( $w_{sq}$ , м/с), которая также может быть использована для оценки времени приспособления  $\tau_p = w_{sq} / g$ , позволяя ранжировать частицы МП по инерционности [9]. Скорость  $w_{sq}$  может быть оценена, исходя из параметров частиц и жидкости по известным эмпирическим зависимостям [10–11], что применялось для МП, например, в работе [9] вместо непосредственного измерения  $w_{sq}$ . Однако при исследовании влияния волнения на скорость оседания целесообразно экспериментально измерять  $w_{sq}$  используемых частиц, чтобы исключить влияние неточностей эмпирических формул, особенно в случае частиц, форма которых сильно отличается от сферической [12]. При непосредственном измерении  $w_{sq}$  и указанных в начале раздела предположениях допустимо приближенно оценить удельную плотность ( $\rho_p/\rho_f$ ) МП по скорости оседания, поскольку в этом случае она является лишь диагностической величиной. Измерение плотности МП с хорошей точностью может понадобиться для оценок потоков массы, но это выходит за рамки настоящей работы.

Предполагается, что для приближенных оценок параметров поверхностных гравитационных волн допустимо применение дисперсионного соотношения:

$$\omega^2 \approx g k \operatorname{th}(kh), \quad (2)$$

где  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число (рад/м),  $\lambda$  — длина волны (м),  $\omega = 2\pi/T$  — циклическая частота (рад/с),  $h$  — глубина жидкости (м).

Таблица 1

Table 1

### Основные размерные параметры

### Significant dimensional parameters

| Обозначение | Ед. измерения     | Описание                                                  |
|-------------|-------------------|-----------------------------------------------------------|
| $D_p$       | м                 | Эквивалентный сферический диаметр / Масштаб длины частицы |
| $\rho_f$    | кг/м <sup>3</sup> | Плотность воды                                            |
| $\rho_p$    | кг/м <sup>3</sup> | Плотность частицы                                         |
| $\nu$       | м <sup>2</sup> /с | Кинематическая вязкость                                   |
| $g$         | м/с <sup>2</sup>  | Ускорение свободного падения                              |
| $w_{sq}$    | м/с               | Конечная скорость оседания в неподвижной жидкости         |
| $h$         | м                 | Глубина течения (канала)                                  |
| $U$         | м/с               | Средняя скорость течения (по результатам измерений)       |
| $A$         | м                 | Амплитуда волны (изм.). $H = 2A$ — высота волны           |
| $T$         | с                 | Период волны                                              |

Таким образом, имеем 9 независимых друг от друга определяющих размерных параметров ( $D_p$ ,  $\rho_p$ ,  $\nu$ ,  $g$ ,  $w_{sq}$ ,  $h$ ,  $U$ ,  $A$ ,  $T$ ), среди которых 3 с независимыми размерностями, из которых можно составить 6 независимых безразмерных величин. Рассмотрим безразмерные параметры, характеризующие процесс движения (оседания) МП в толще воды в условиях волнения.

Число Архимеда

$$Ar = gD_p^3 (\rho_p - \rho_f) / (\rho_f \nu^2) \quad (3)$$

используется в качестве безразмерного диаметра частицы, в частности, в формулировке эмпирического выражения для терминальной скорости оседания частицы [10]. Режим обтекания частицы и коэффициент гидродинамического сопротивления зависят от числа Рейнольдса частицы  $Re_p$ . Чаще всего его определяют, используя  $w_{sq}$  в качестве масштаба разности скоростей частицы и окружающей ее жидкости:

$$Re_p = w_{sq} D_p / \nu. \quad (4)$$

Для частиц МП с размерами от 0,5 до 5 мм характерны значения  $1 < Re_p < 10^3$ . Такие частицы при оседании в неподвижной жидкости имеют тенденцию разворачиваться таким образом, чтобы гидродинамическое сопротивление было наибольшим, а также демонстрируют различные вторичные движения (вращение, регулярные колебания) [13]. Эти эффекты могут оказывать влияние на транспорт частиц в условиях волнения [5, 14]. Для более детального исследования эффектов ориентации несферических частиц в работе [14] предложено использовать сдвиговое число Рейнольдса в виде:

$$Re_s = ka(z) \omega d_a^2 / \nu, \quad (5)$$

где  $k a(z)$  — безразмерный вертикальный сдвиг скорости, определяемый исходя из линейной теории, как

$$ka(z) = kA \sinh[k(z+h)] / \sinh(kh), \quad (6)$$

и  $z$  — текущая глубина (м), с точкой отсчета ( $z = 0$ ) на невозмущенной поверхности воды.

При исследовании неустановившегося движения частиц в жидкости часто вводится отношение характерных временных масштабов движений частицы и жидкости, или число Стокса, определяемое на основе характерного периода волнения следующим образом:

$$St = \tau_p / \tau_w = (w_{sq} / g) / T. \quad (7)$$

При  $St \ll 1$  частицы следуют движениям жидкости. Для МП характерны значения  $St < 1$ . В лабораторных условиях для МП был характерен диапазон чисел Стокса  $0,012 < St < 0,062$  [9] и  $0,023 < St < 0,363$  [6]. Оценки  $St$  в представленных в настоящей работе экспериментах дают диапазон  $6 \cdot 10^{-4} - 3 \cdot 10^{-3}$ . Для тех же частиц в натурных условиях  $St$  может быть еще меньше, вследствие много больших достижимых  $T$ . Насколько известно авторам, пока не найдены закономерности переноса МП в условиях волнения, связанные с числом Стокса.

Рядом исследователей предложены иные наборы безразмерных параметров, не включающие число Стокса. В частности, для описания процесса переотложения частиц МП в прибрежной зоне применялось число Дина в виде  $\Omega = H_{SW} / (T_0 w_{sq})$ , где  $H_{SW}$  — высота значительных волн (м), а  $T_0$  — пиковый период (с) [15], которое часто используется в качестве безразмерной скорости оседания частиц в исследовании динамики морских пляжей [16]. Также применялось число Келегана-Карпентера в форме  $K_C = (\omega A + U) \times (1/\omega) / D_p$  (отношение максимального смещения жидкости за один период волны к размеру частицы) [7]. В рассматриваемой в данной работе задаче частица движется в толще жидкости, при этом её траектория формируется под влиянием трех физических процессов: оседания частицы под действием силы тяжести со скоростью порядка  $w_{sq}$ , дрейфа этой частицы в горизонтальном направлении со скоростью порядка  $U$  и периодических колебаний за счет поверхностных гравитационных волн амплитудой  $A = H/2$  и периодом  $T$ . Качественный характер оседания частицы (вид траектории) будет зависеть от относительного вклада этих процессов. Поэтому могут быть полезными две безразмерные комбинации:  $H/(T w_{sq})$  и  $H/(TU)$ , которые можно интерпретировать как отношение характерного расстояния, на которое смещаются частицы жидкости за счет волновых движений за один период  $T$ , к расстоянию, которое за это время проходит частица в вертикальном и горизонтальном направлении соответственно. Если обе эти величины больше 1, то проекция траектории частицы на вертикальную плоскость будет иметь множество самопересечений («разомкнутые эллипсы»), в противном случае можно ожидать траектории в виде волнистых кривых без самопересечений. Результаты эксперимента подтверждают правомерность такой трактовки (см. раздел 4.1).

Следуя [17], для описания режима волнения часто используется величина  $H/gT^2$ . Эту величину можно также интерпретировать как меру крутизны волны. Также важным является отношение глубины жидкости и длины волны. Следуя [9], можно использовать это отношение в форме  $kh$ . При таком выборе значения  $0,3 < kh < 3$  соответствуют волнам, распространяющимся в жидкости промежуточной глубины.

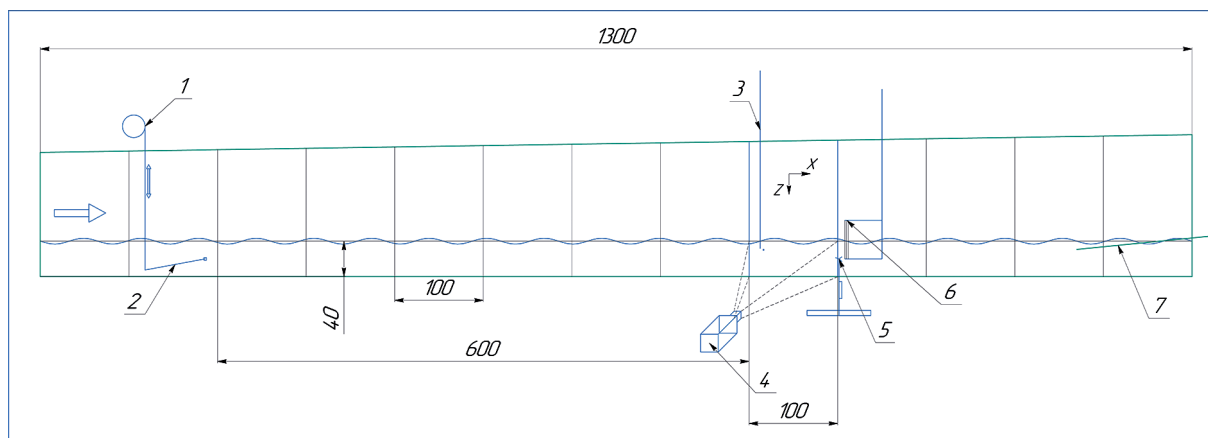
### 3. Материалы и методы

#### 3.1. Экспериментальная установка, режимы и процедура

Лабораторные эксперименты проводились на Ветроволновом термостратифицированном бассейне (ВВТСБ) ИПФ РАН (схема см. рис. 1). По сравнению с базовым вариантом [18] установка была существенно модернизирована.

Новый канал имеет увеличенную ширину 70 см. Высота аэродинамического канала увеличивается от 70 см на входе до 90 см на выходе, обеспечивая безградиентный воздушный поток вдоль всей длины по аналогии с натурными условиями. За счет установки канала в большой чаше бассейна глубиной до 170 см обычно реализуются условия глубокой воды. В настоящей работе установка фальшдна на глубине  $h = 40$  см от невозмущенной поверхности позволила реализовать условия промежуточной глубины (см. значения параметра  $kh$  в табл. 2), характерные для прибрежной зоны моря. При этом канал с подводной части, как и ранее, открыт с обоих торцов, что обеспечивает отсутствие противотока.

Характеристики индуцируемых волн и течений в экспериментах определялись комбинациями параметров работы волнопродуктора (размах 20 см, период  $T$ ), установленного в начале канала, и скоростью создаваемого воздушного потока  $U_w$ , м/с (см. табл. 2).



**Рис. 1.** Схема эксперимента: 1 — привод волнопродуктора, 2 — рабочее тело волнопродуктора, 3 — устройство для ввода частиц, 4 — обозначение камеры, снимающей вид сбоку, 5 — ADV измеритель скорости, 6 — струнный волнограф, 7 — волногаситель

**Fig. 1.** Scheme of the experiment: 1 — wavemaker motor, 2 — wavemaker body, 3 — particle ejection device, 4 — side view taking video, 5 — ADV velocity gauge, 6 — wire wavegauge, 7 — wave absorber

Таблица 2

Table 2

#### Условия экспериментов

#### Experimental conditions

|     | $A$ , см | $T$ , с | $U_w$ , м/с | $kh$ | $H/gT^2$ | $U_{ADV}$ , см/с |
|-----|----------|---------|-------------|------|----------|------------------|
| E01 | 4        | 1,7     | 0           | 0,8  | 0,003    | 1                |
| E02 | 3        | 1,7     | 14,5        | 0,8  | 0,002    | 17               |
| E03 | 9        | 1,2     | 14,5        | 1,3  | 0,013    | 7,5              |
| E04 | 6,5      | 1,2     | 0           | 1,3  | 0,009    | −1,5             |

Движение частиц под водой снималось сбоку со скоростью 160 кадров/с камерой в полупогруженном стеклянном боксе, расположенном внутри 8-й секции канала (6 м от волнопродуктора). Сразу за правой границей области наблюдения за частицами помещались измерительные части акустического доплеровского измерителя скорости (*ADV*) (на 20 см от дна канала) и струнного волнографа. По данным первого была восстановлена скорость течения  $U_{ADV}$ , а по записям второго восстанавливалась  $H(A)$  в области наблюдения. В ходе эксперимента частицы помещались под поверхность воды по одной при помощи мини-атюрного захвата, закрепленного на длинном тонком стержне. Одновременно с видеосъемкой движения частицы производилась запись показаний волнографа и *ADV*. Алгоритмы анализа траекторий, используемые в настоящей работе, наиболее надежно работают в случае, когда частица в среднем за период смещается на небольшое расстояние, поэтому случай E02 длиннопериодных волн с сильным ветровым дрейфом ( $H/(TU_{ADV}) < 1$ ) был исключен из количественного анализа.

### 3.2. Экспериментальные частицы

Наборы экспериментальных частиц включали в себя частицы трёх различных форм (трёхмерные фрагменты, плоские и вытянутые). Плоские хлопья и пластины изготовлены как из жёстких (сопротивляющихся изгибам) материалов, так и из гибких (текстиль) (рис. 2). Для изготовления частиц использовались различные бытовые предметы (пластиковая тара, одноразовая посуда), а также 3D-печать. Материалы и размеры частиц подобраны так, чтобы обеспечить определённые значения скорости оседания частиц (см. табл. 3), удобные для дальнейшего сравнения и анализа. Частицы P01, P06, P07, P08, P11 изготовлены из ABS (акрилонитрил бутадиен стирол), P02, P03 — из PS (полистирол), P12, P13 — из PET (полиэтилентерефталат), P04, P05 — из пористых хозяйственных салфеток (смесь вискозы и полиэстера), P09, P10 — из хозяйственных тряпок (микрофибра).

По скоростям оседания  $w_{sq}$  частицы образуют наборы 1 см/с, 2 см/с и 3,7 см/с (см. табл. 2). В настоящей работе  $w_{sq}$  определялась экспериментально, также измерялись размеры частиц, а их плотность оценивалась косвенным путем. Измерения скорости оседания выполнялись путем замера времени, за которое частица падала 80 см в неподвижной дистиллированной воде при температуре 22 °C (описание установки см. [12]). Выборочному измерению подвергались по 10 частиц каждого типа.

В таблице 3 также приводится безразмерная удельная плотность частицы  $\rho_p/\rho_f$ . Она используется для вычисления  $Ar$  и может быть полезна при сравнении полученных результатов с другими работами. Величина  $\rho_p/\rho_f$  вычисляется из непосредственно измеряемой  $w_{sq}$  согласно эмпирической формуле [10]:

$$\log_{10}(W) = -3,76715 + 1,92944 \log_{10}(Ar) - 0,09815 \log_{10}^2(Ar) - 0,00575 \log_{10}^3(Ar) + 0,00056 \log_{10}^4(Ar), \quad (8)$$

где  $W = \rho_f w_{sq}^3 / [(\rho_p - \rho_f) g \nu]$ . Поскольку в качестве характерного размера частицы взят эквивалентный сферический диаметр, то величину  $\rho_p$ , определяемую по формуле (8), следует понимать как плотность сферы, имеющей ту же терминальную скорость оседания, что и экспериментальная частица МП (а не как плотность

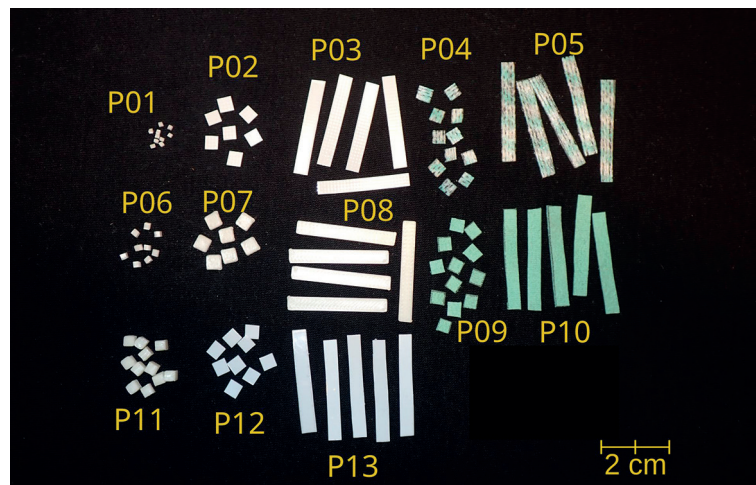


Рис. 2. Внешний вид экспериментальных частиц (обозначения — см. табл. 3)

Fig. 2. Appearance of experimental particles (for labels — see Table 3)

Таблица 3

Table 3

Параметры экспериментальных частиц  
Particle parameters

|     | Форма                        | $d_a$ , мм | $d_b$ , мм | $d_c$ , мм | $w_{sq}$ , см/с | $D_p$ , мм | $\rho_p/\rho_f$ | Ar    | Re <sub>p</sub> |
|-----|------------------------------|------------|------------|------------|-----------------|------------|-----------------|-------|-----------------|
| P01 | Кубы                         | 1,0        | 1,0        | 1,0        | $1,0 \pm 0,1$   | 1,2        | 1,027           | 447   | 12              |
| P02 | Пластины (жесткие)           | 4          | 4          | 0,1        | $1,26 \pm 0,05$ | 1,5        | 1,025           | 810   | 18              |
| P03 | Вытянутые пластины (жесткие) | 28         | 4          | 0,1        | $1,22 \pm 0,06$ | 2,8        | 1,008           | 1798  | 34              |
| P04 | Пластины (гибкие)            | 4          | 4          | 0,1        | $1,06 \pm 0,05$ | 1,5        | 1,020           | 645   | 15              |
| P05 | Вытянутые пластины (гибкие)  | 30         | 4          | 0,1        | $1,15 \pm 0,07$ | 2,8        | 1,008           | 1658  | 32              |
| P06 | Кубы                         | 1,7        | 1,7        | 1,7        | $2,02 \pm 0,08$ | 2,1        | 1,027           | 2426  | 42              |
| P07 | Пластины (жесткие)           | 4          | 4          | 0,8        | $1,93 \pm 0,08$ | 2,9        | 1,015           | 3582  | 56              |
| P08 | Вытянутые пластины (жесткие) | 30         | 4          | 1,1        | $1,98 \pm 0,06$ | 6,3        | 1,005           | 11539 | 124             |
| P09 | Пластины (гибкие)            | 4          | 4          | 0,5        | $2,18 \pm 0,07$ | 2,5        | 1,023           | 3450  | 54              |
| P10 | Вытянутые пластины (гибкие)  | 30         | 4          | 0,5        | $1,96 \pm 0,09$ | 4,9        | 1,007           | 7821  | 95              |
| P11 | Кубы                         | 2,9        | 2,9        | 2,9        | $3,7 \pm 0,1$   | 3,6        | 1,028           | 12737 | 132             |
| P12 | Пластины (жесткие)           | 4          | 4          | 0,2        | $3,6 \pm 0,1$   | 1,8        | 1,078           | 4415  | 65              |
| P13 | Вытянутые пластины (жесткие) | 30         | 4          | 0,2        | $3,8 \pm 0,2$   | 3,6        | 1,030           | 13261 | 135             |

полимера, из которого она состоит). При расчетах принято  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ,  $\nu = 1,006 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ . Оседание всех экспериментальных частиц происходит за пределами вязкого режима:  $Ar > 2$ ,  $Re_p$  в диапазоне 12–135. Значение  $\rho_p$  для кубических частиц (т. е. изометрических, для которых оценки по формуле (8) наиболее близки к физическим плотностям полимеров) достаточно точно соответствует плотности пластика ABS, из которого они изготовлены, которая составляет  $1,025 \text{ г/см}^3$  по результатам измерений методом флотации.

### 3.3. Процедура обработки траекторий частиц

Положение частицы на полученных фотографиях определялась полуавтоматически с использованием алгоритмов OpenCV [19]. В результате дельнейшей обработки получались зависимость координат ( $x$ ,  $z$ ) частицы от времени. Координата  $z$  отсчитывалась вниз от уровня невозмущенной поверхности, координата  $x$  растет вправо. Траектории сглаживались с использованием Р-сплайнов [20].

Траектории, наблюдаемые в эксперименте, не являются замкнутыми поскольку совершающая периодические колебания частица движется со средней горизонтальной скоростью  $V_x$ . Период волны, определенный в фиксированной точке волнографом ( $T$ ), будет отличаться от периода  $T_L$  (лагранжев период), измеряемого в системе отсчета, связанной с частицей, движущейся со скоростью  $V_x$ . Поскольку длина волны одинакова в обеих системах отсчета, то величины  $T$ ,  $T_L$ ,  $V_x$  и фазовая скорость волны в неподвижной системе отсчета с связаны соотношением [21]:

$$\frac{T_L - T}{T} = \frac{V_x / c}{1 - V_x / c}. \quad (9)$$

В настоящей работе дрейф частиц исследуется на основе измерений  $T_L$ . Измерение  $T_L$ , в отличие от  $V_x$ , не подвержено влиянию ошибки измерения длины пути частицы, возникающей, если частица отклоняется от осевой плоскости в направлении к наблюдателю или от него. Процедура определения  $T_L$  заключается в минимизации функционала [22]:

$$\frac{1}{T_L} \int_{t_0 - T_L/2}^{t_0 + T_L/2} \sqrt{(x(t + T_L) - x(t) - x_0)^2 + (z(t + T_L) - z(t) - z_0)^2} dt, \quad (10)$$

где  $x(t)$ ,  $z(t)$  — координаты частицы в момент времени  $t$ ,  $t_0$  — начальная фаза,  $x_0$ ,  $z_0$  — (неизвестные) смещения частицы за период  $T_L$  по горизонтальной и вертикальной осям. Начальная фаза варьируется для определения изменения  $T_L$  по времени и глубине. После этого скорость оседания в окрестности момента времени  $t_0$  вычислялась как  $V_z(t = t_0) = z_0/T_L$ . Средняя скорость оседания частицы определяется как среднее значение этой величины по всем значениям  $t_0$  (далее будет обозначаться просто символом  $V_z$ ). Использование (10) при исследовании вертикальной скорости частиц не увеличивает точность, но позволяет унифицировать алгоритм.

## 4. Результаты

### 4.1. Общий характер оседания частиц

В каждом из 4-х гидродинамических режимов было запущено по 12–15 частиц каждого типа из тринадцати, что в общей сложности составило 630 запусков. Траектории экспериментальных частиц в режиме E01 (без ветра, рис. 2, *a*) имеют характерный вид, свойственный траекториям жидких частиц при распространении волн в направлении течения (см., например, [23]), с поправкой на постепенное оседание частицы с отрицательной плавучестью. С увеличением глубины амплитуда вертикальных волновых движений уменьшается почти до нуля. В режиме E02, который формируется той же частотой волнопродутора, что в E01, и, дополнительно, воздушным потоком, формируется сильное дрейфовое течение в направлении распространения волны так, что параметр  $H/(TU) = 0,24 < 1$  (в качестве оценки  $U$  берется модуль  $U_{ADV}$ ). В результате, траектории не имеют петель (рис. 2, *б*). Из-за особенностей алгоритма обработки и того, что в режиме E02 в рабочей зоне частицы проводили не более двух периодов волны, данный режим не подвергался дальнейшему количественному анализу. В режиме E04 (без ветра) имело место течение в направлении, противоположном распространению волн, что также проявляется на траекториях, у которых в отличие от случая E01 нижняя часть петель длиннее верхних (рис. 4). Здесь,

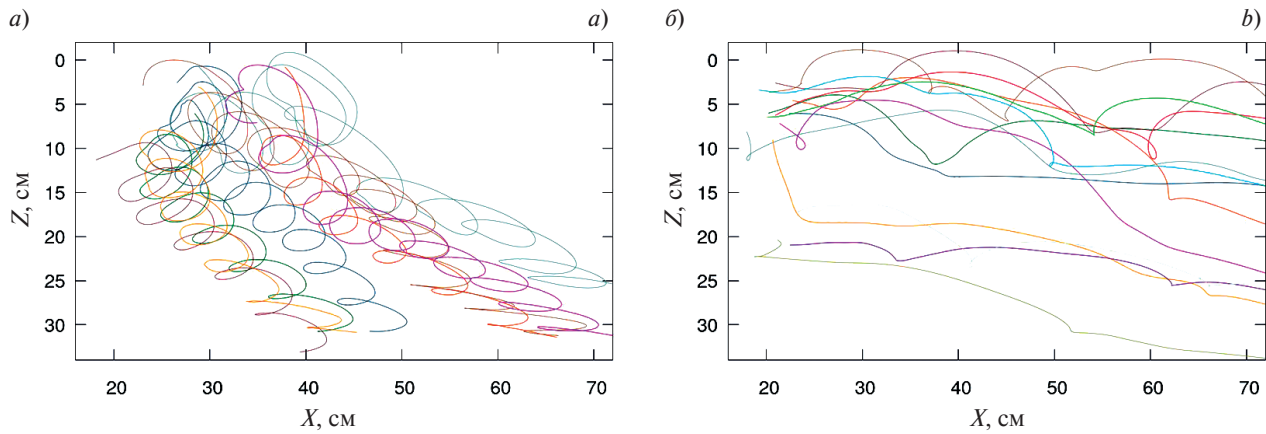


Рис. 3. Траектории частиц: *a* — примеры траекторий частиц P07 в режиме E01; *б* — пример траекторий частиц типа P07 в режиме E02

Fig. 3. Particle trajectories: *a* — P07-particle trajectories in experiment E01; *b* — P07-particle trajectories in experiment E02

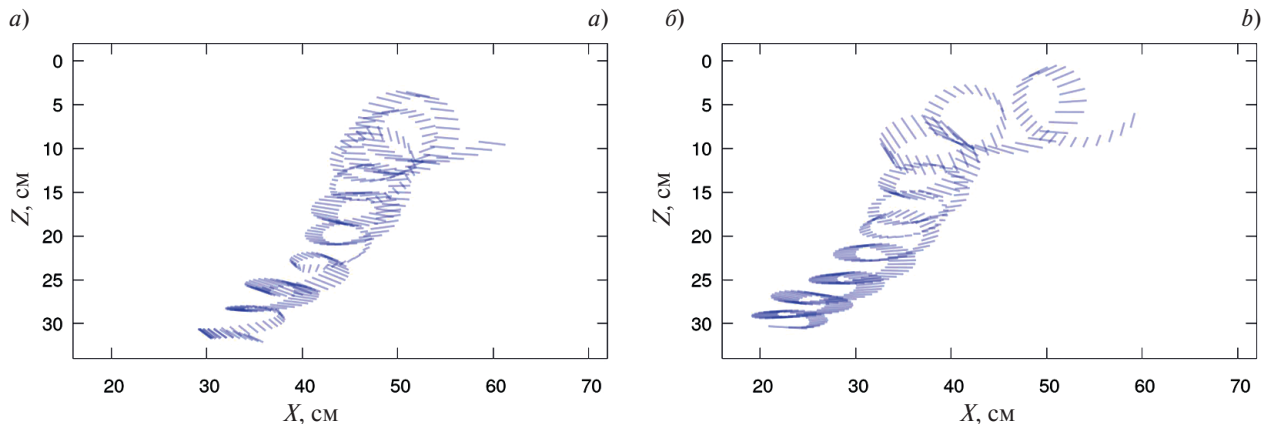


Рис. 4. Положение вытянутой частицы (тип P10 в эксперименте E04) в последовательные моменты времени. *a* и *б* — различные броски. Отрезки прямых проведены между видимыми концами частицы в одинаковые моменты времени, толщина линий выбрана произвольно и не соответствует размеру  $d_b$

Fig. 4. Position of an elongated particle (P10 in experiment E04) at successive times. *a* and *b* — different throws. The line segments are drawn between the visible ends of the particle at the same time moments. The thickness of the lines is chosen arbitrarily and does not correspond to the  $d_b$

как и в случае E01, течение возникает из-за особенностей режима работы волнопродуктора. В режиме E03 (эквивалентно E04 с воздействием ветра) дрейфовое течение не такое сильное, как в случае E02, сонаправлено с распространением волн с более коротким периодом, поэтому на траекториях также наблюдались петли. Вид траекторий указывает на то, что среднее течение было однонаправленным по всей глубине жидкости (в положительном направлении для экспериментов E01, E02, E03 и противоположным в эксперименте E04).

Плоские частицы (квадратные и прямоугольные пластины) не совершали хаотических вращений или переворотов, но стремились принять устойчивое положение, зависящее от фазы волны, и, вероятно, соответствующее максимальной плоскости проекции частицы на направление течения. При опускании вытянутых частиц наблюдались их вторичные движения в виде наклона длинной оси, как можно наблюдать на рис. 4. Гибкие и жесткие частицы не показали заметных отличий в характере оседания, гибкие частицы искривлялись только в начальный момента движения из выпускного устройства и, как правило, опускались в вытянутом виде. Это может быть связано с тем, что их длина, даже для вытянутых частиц (3 см), была много меньше длины волны.

#### 4.2. Скорость оседания

Для определения влияния режима волнения и воздействия ветра на оседание частиц МП для каждой комбинации «гидродинамический режим / тип частицы» была найдена средняя скорость оседания  $V_z$ , путем нахождения среднего значения  $V_z$  по всем заснятым и успешно обработанным траекториям. Всего в анализ включено 139, 115 и 164 траектории из экспериментов E01, E03, E04, соответственно. Рисунок 5 позволяет сравнить скорости оседания частиц в неподвижной жидкости и в условиях волнения. В режиме с ветром заметна слабая тенденция к уменьшению скорости оседания вплоть до отрицательной, означающей всплытие частицы.

Для проверки или опровержения данного наблюдения была определена статистическая значимость разницы  $V_z$  с помощью  $t$ -критерия Уэлча с условием  $p < 0,05$ . Анализ показал, что только в 11-ти случаях из 39-ти имеет место значимая разница между средней скоростью оседания в неподвижной жидкости и в условиях волнения. Отличия  $V_z$  в режиме с и без ветра оказались статистически значимыми только в 2-х случаях из 13-ти, а именно, для частиц вида P06 (кубики) и P13 (пластины). Отличия  $V_z$  между режимами без ветра, но с разным периодом волнения оказались значимыми в 3-х случаях из 13-ти, а именно, для частиц P02 (квадратные хлопья из жесткого материала), P09 (квадратные хлопья из гибкого материала) и P11 (кубики). При этом отсутствует какая-либо закономерность, которая могла бы указывать на особенности оседания частиц определенной формы.

Таким образом, отличительной особенностью режима с ветром является значительна возросший разброс  $V_z$ , но при этом эксперимент не показал статистически значимых различий скоростей оседания МП в среднем.

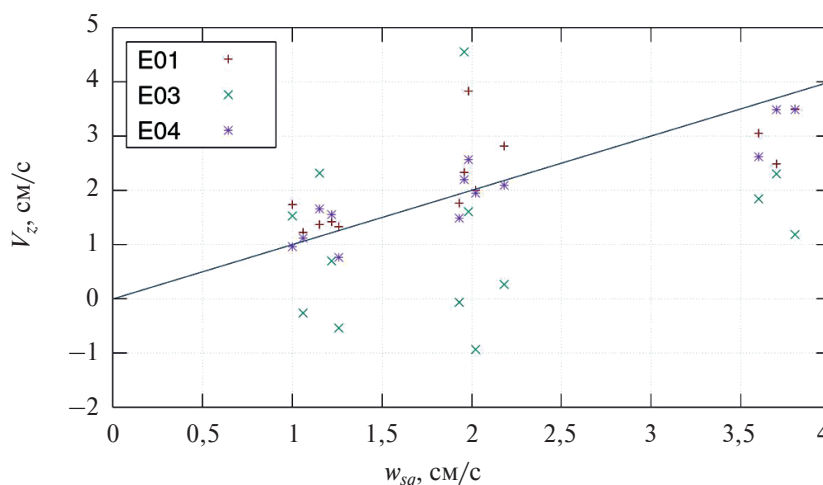


Рис. 5. Диаграмма рассеяния для скорости оседания, линия означает точное совпадение

Fig. 5. Scatter plot for the settling velocity, line indicates perfect agreement

#### 4.3. Лагранжев период и скорость дрейфа

Средняя скорость горизонтального дрейфа частиц на глубине 15–20 см (на глубине, на которой производились измерения  $ADV$ ) для экспериментов E01, E03, E04 составила 2, 10 и  $-2$  см/с соответственно, при этом  $U_{ADV}$  составила 1, 7,5 и  $-1,5$  см/с. Таким образом, увеличение скорости дрейфа частиц в эксперименте E03 по сравнению с экспериментом E04 связано с наличием ветрового дрейфового течения в канале.

На рис. 6 показаны средние по типу частиц профили  $T_L/T-1$ , построенные на основе профилей  $T_L$  отдельных частиц, полученных согласно (10). Для экспериментов без ветра полученные профили образуют одну общую линию, что указывает на слабое влияние формы и скорости оседания на горизонтальную скорость частицы.

У поверхности и в придонном слое профили не обеспечены данными из-за особенностей регистрации движения частиц. На глубинах 5–25 см под поверхностью среднее значение  $T_L/T-1$  в каждом из режимов хорошо согласуется со средней скоростью дрейфа частиц по формуле (9). Поэтому отличительной особенностью режима с ветром является значительная дисперсия значений безразмерного избыточного периода частиц и их горизонтальной скорости.

#### 5. Обсуждение

Проведены эксперименты в ветроволновом канале, в ходе которых были измерены скорости оседания и дрейфа частиц МП различной формы и с различными конечными скоростями оседания в неподвижной жидкости. Цель экспериментов заключалась в прослеживании влияния волн на оседание и дрейф частиц МП. Рассмотрим сначала результаты экспериментов в режимах с более регулярным (чем ветровое) волнением, сформированным одним только волнопродуктором. Численное моделирование оседания частиц с небольшими диаметрами (0,1–1 мм) показало [17], что скорость оседания в условиях волнения превышает скорость оседания в неподвижной жидкости в течение десятков — первых сотен периодов. Это означает, что изменения средней скорости оседания под действием волн будут тем более заметны, чем быстрее завершается процесс оседания (из-за достижения частицей дна, в случае небольших глубин, или опускания на глубину, где действие поверхностных волн несущественно). Однако относительная разница скоростей невелика и уменьшается с увеличением размера частицы (а значит и конечной скорости оседания), опускаясь до 2–3 % в случае самых крупных частиц (1 мм). Экспериментальные исследования [6] подтверждают теоретические результаты [17]: средняя скорость оседания в условиях волнения приближается сверху к теоретической скорости оседания в спокойной жидкости по мере увеличения числа Рейнольдса частиц и их скорости оседания. Отметим, что описанные в настоящей работе экспериментальные результаты допускают почти прямое сравнение с наиболее крупными частицами в экспериментах [6], поскольку те близки как по параметрам частиц ( $Re_p$  лежит в диапазоне первых десятков, скорости оседания 1–1,5 см/с), так и по режиму волнения (параметр  $H/gT^2$  находился в диапазоне 0,004–0,013). В настоящей работе использованы также частицы с еще большими скоростями оседания и числами Рейнольдса (до 3,8 см/с и 135,

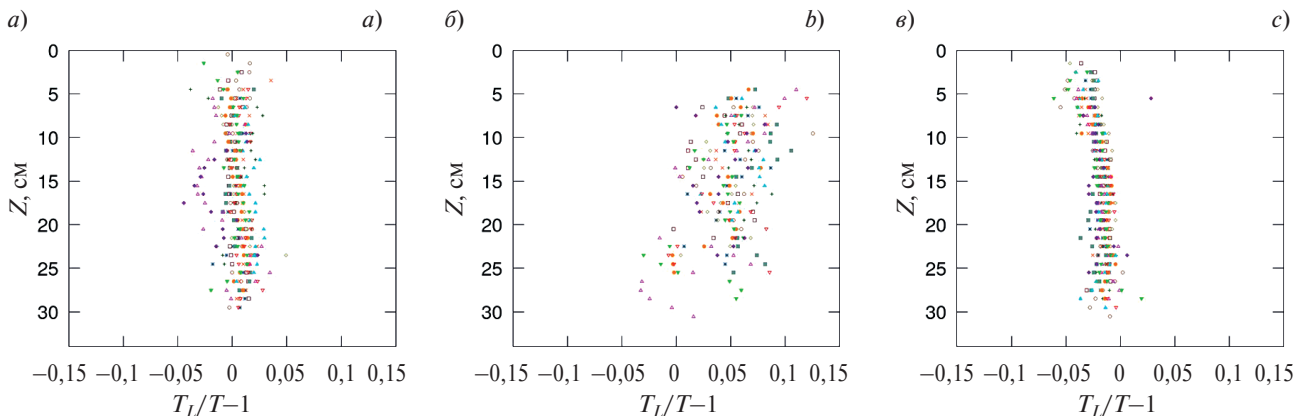


Рис. 6. Вертикальные профили безразмерного избыточного лагранжева периода частицы  $(T_L - T)/T_L$ : а — эксперимент E01, б — E03, в — E04

Fig. 6. Vertical profiles of the Lagrangian excess period  $(T_L - T)/T_L$ : а — experiment E01, б — E03, в — E04

соответственно), для которых отличия, по-видимому, должны быть меньше. Таким образом, переходные процессы [17, 24] не могли оказать заметного влияния на среднюю скорость оседания в наших экспериментах, и поэтому результаты, указывающие на равенство скоростей оседания под волнами и в спокойной жидкости можно считать достоверными.

Схожие эксперименты, но в гидродинамическом режиме, полученном в экспериментальном канале совместным действием волнопродуктора и ветра, насколько известно авторам, ранее не проводились. Данный режим отличался более широким спектром поверхностного волнения, высокой скоростью дрейфового течения, возникающими время от времени обрушениями волн. Тем не менее и в этом случае результаты указывают на то, что средняя скорость оседания частиц определяется конечной скоростью оседания в спокойной жидкости, а средняя горизонтальная скорость (дрейфа) следует средней скорости течения. Отличительной особенностью режима с ветром является значительно возросшая дисперсия горизонтальной и вертикальной скорости частиц. Отчасти это можно объяснить меньшей статистикой из-за того, что каждая частица отслеживалась в течение более короткого промежутка времени (всего нескольких периодов волнения), что вызвано сильно возросшей скоростью дрейфа. Действительно, лабораторные эксперименты [7] показывают, что регулярное волнение приводит к увеличению дисперсии оседающих частиц (под дисперсией в этом случае понимался разброс координат осевших на дно частиц) по сравнению с условиями стационарного течения, что может быть связано с разностью фазы волны в момент начала оседания отдельных частиц, а для несферических частиц — с наличием у частиц предпочтительной ориентации по отношению к потоку, приводящей к постоянной смене их положения, а значит и коэффициента гидродинамического сопротивления [14]. Частицы, выпущенные с различной начальной ориентацией и при разной начальной фазе волны, имеют разную историю взаимодействия с движениями жидкости и их траектории расходятся. Наши эксперименты, в которых при отсутствии ветра частицы разной формы не показали существенных отличий в оседании и дрейфе, а ориентация частиц имела схожую динамику в режимах с ветром и без, возросшая дисперсия средних скоростей, по-видимому, связана с мультимасштабностью движений жидкости и общей хаотизацией потока в режиме с ветром. Иными словами, в широком диапазоне гидродинамических условий, включающий как аналог «зыби», так и режим «штормового моря» движения жидкости имеют определяющую роль.

## 6. Заключение

В ходе лабораторных экспериментов получены и проанализированы траектории оседания пластиковых частиц различной формы в условиях поверхностного волнения и течения. По сравнению с предшествующими работами, гидродинамические условия в экспериментах характеризовались меньшей регулярностью волнения, в особенности при наличии ветра, при котором спектр поверхностного волнения был довольно широк, что в большей степени соответствует натурным ситуациям. Результаты указывают на то, что средняя скорость оседания частиц определяется конечной скоростью оседания в спокойной жидкости, а средняя горизонтальная скорость (дрейфа) следует средней скорости течения. Присутствие ветра усиливает горизонтальный перенос из-за усиления дрейфового течения и резко увеличивает дисперсию скоростей частиц и, следовательно, их пространственный разброс. Полученные результаты могут быть потенциально полезны при разработке численных моделей переноса МП, в том числе необходимых для предсказания выбросов морского мусора на побережье в зависимости от погодных условий, что актуально при организации мероприятий по очистке пляжей.

## Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-77-00027 с использованием Уникальной научной установки «Комплекс крупномасштабных геофизических стендов» ИПФ РАН (<http://www.ckp-rf.ru/usu/77738/>). Измерения скоростей оседания МП в неподвижной жидкости выполнены в рамках государственного задания ИО РАН (тема № FMWE-2021-0012).

## Funding

The study was conducted with support the Russian Science Foundation grant No. 21-77-00027 using a unique scientific installation “Complex of large-scale geophysical facilities of the IAP RAS” (<http://www.ckp-rf.ru/usu/77738/>). Measurements of terminal settling velocity of MP in a still water were carried out within the framework of the IO RAS state assignment FMWE-2021-0012.

## Литература

1. Kukulka T., Proskurowski G., Morét-Ferguson S., Meyer D.W., Law K.L. The effect of wind mixing on the vertical distribution of buoyant plastic debris // *Geophysical Research Letters*. 2012. Vol. 39, N 7. P. L0760. doi:10.1029/2012GL051116
2. Isobe A., Kubo K., Tamura Y. et al. Selective transport of microplastics and mesoplastics by drifting in coastal waters // *Marine Pollution Bulletin*. 2014. Vol. 89, N 1–2. P. 324–330. doi:10.1016/j.marpolbul.2014.09.041
3. Fujimura A.G., Reniers A.J., Paris C.B. et al. Numerical simulations of larval transport into a rip-channelled surf zone // *Limnology and Oceanography*. 2014. Vol. 59, N 4. P. 1434–1447. doi:10.4319/lo.2014.59.4.1434
4. Fuchs H.L., Hunter E.J., Schmitt E.L., Guazzo R.A. Active downward propulsion by oyster larvae in turbulence // *Journal of Experimental Biology*. 2013. Vol. 216, N 8. P. 1458–1469. doi:10.1242/jeb.079855
5. Clark L.K., DiBenedetto M.H., Ouellette N.T., Koseff J.R. Settling of inertial nonspherical particles in wavy flow // *Physical Review Fluids*. 2020. Vol. 5, N 12. P. 124301. doi:10.1103/PhysRevFluids.5.124301
6. De Leo A., Cutroneo L., Sous D. et al. Settling velocity of microplastics exposed to wave action // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9, N 2. P. 142. doi:10.3390/jmse9020142
7. Clark L.K., DiBenedetto M.H., Ouellette N.T., Koseff J.R. Dispersion of finite-size, non-spherical particles by waves and currents // *Journal of Fluid Mechanics*. 2023. Vol. 954. P. A3. doi:10.1017/jfm.2022.968
8. Forsberg P.L., Sous D., Stocchino A., Chemin R. Behaviour of plastic litter in nearshore waters: First insights from wind and wave laboratory experiments // *Marine Pollution Bulletin*. 2020. Vol. 153. P. 111023. doi:10.1016/j.marpolbul.2020.111023
9. Alsina J.M., Jongedijk C.E., van Sebille E. Laboratory measurements of the wave-induced motion of plastic particles: Influence of wave period, plastic size and plastic density // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2020. Vol. 125, N 12. P. e2020JC016294. doi:10.1029/2020JC016294
10. Dietrich W.E. Settling velocity of natural particles // *Water Resources Research*. 1982. Vol. 18, N 6. P. 1615–1626. doi:10.1029/WR018i006p01615
11. Zhiyao S., Tingting W., Fumin X., Ruijie L. A simple formula for predicting settling velocity of sediment particles // *Water Science and Engineering*. 2008. Vol. 1, N 1. P. 37–43. doi:10.1016/S1674-2370(15)30017-X
12. Khatmullina L., Isachenko I. Settling velocity of microplastic particles of regular shapes // *Marine Pollution Bulletin*. 2017. Vol. 114, N 2. P. 871–880. doi:10.1016/j.marpolbul.2016.11.024
13. Hazzab A., Terfous A., Ghenaim A. Measurement and modeling of the settling velocity of isometric particles // *Powder Technology*. 2008. Vol. 184, N 1. P. 105–113. doi:10.1016/j.powtec.2007.08.009
14. DiBenedetto M.H., Koseff J.R., Ouellette N.T. Orientation dynamics of nonspherical particles under surface gravity waves // *Physical Review Fluids*. 2019. Vol. 4, N 3. P. 034301. doi:10.1103/PhysRevFluids.4.034301
15. Guler H.G., Larsen B.E., Quintana O. et al. Experimental study of non-buoyant microplastic transport beneath breaking irregular waves on a live sediment bed // *Marine Pollution Bulletin*. 2022. Vol. 181. P. 113902. doi:10.1016/j.marpolbul.2022.113902
16. Jackson D.W.T., Cooper J.A.G., Del Rio L. Geological control of beach morphodynamic state // *Marine Geology*. 2005. Vol. 216, N4. P. 297–314. doi:10.1016/j.margeo.2005.02.021
17. Stocchino A., De Leo F., Besio G. Sea waves transport of inertial micro-plastics: Mathematical model and applications // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2019. Vol. 7, N 12. P. 467. doi:10.3390/jmse7120467
18. Troitskaya Yu.I., Sergeev D.A., Kandaurov A.A. et al. Laboratory and theoretical modeling of air-sea momentum transfer under severe wind conditions // *Journal of Geophysical Research*. 2012. 117. C00J21 doi:10.1029/2011JC007778
19. OpenCV. URL: <https://opencv.org> (дата обращения: 05.03.2023).
20. ALGLIB User Guide — Penalized regression spline. URL: <https://www.alglib.net/interpolation/leastquares.php> (дата обращения: 05.03.2023).
21. Longuet-Higgins M.S. Eulerian and Lagrangian aspects of surface waves // *Journal of Fluid Mechanics*. 1986. Vol. 173. P. 683–707. doi:10.1017/S0022112086001325
22. Grue J., Kolaas J. Experimental particle paths and drift velocity in steep waves at finite water depth // *Journal of Fluid Mechanics*. 2017. Vol. 810. P. R1. doi:10.1017/jfm.2016.726
23. Судольский А.С. Динамические явления в водоемах. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 263 с.
24. Santamaria F., Boffetta G., Afonso M.M. et al. Stokes drift for inertial particles transported by water waves // *Europhysics Letters*. 2013. Vol. 102, N 1. P. 14003. doi:10.1209/0295-5075/102/14003

## References

1. Kukulka T. et al. The effect of wind mixing on the vertical distribution of buoyant plastic debris. *Geophysical Research Letters*. 2012, 39(7), L0760, doi:10.1029/2012GL051116
2. Isobe A., Kubo K., Tamura Y. et al. Selective transport of microplastics and mesoplastics by drifting in coastal waters. *Marine Pollution Bulletin*. 2014, 89(1–2), 324–330. doi:10.1016/j.marpolbul.2014.09.041

3. Fujimura A.G., Reniers A.J., Paris C.B. et al. Numerical simulations of larval transport into a rip-channeled surf zone. *Limnology and Oceanography*. 2014, 59(4), 1434–1447, doi:10.4319/lo.2014.59.4.1434
4. Fuchs H.L., Hunter E.J., Schmitt E.L., Guazzo R.A. Active downward propulsion by oyster larvae in turbulence. *Journal of Experimental Biology*. 2013, 216(8), 1458–1469, doi:10.1242/jeb.079855
5. Clark L.K., DiBenedetto M.H., Ouellette N.T., Koseff J.R. Settling of inertial nonspherical particles in wavy flow. *Physical Review Fluids*. 2020, 5(12), 124301. doi:10.1103/PhysRevFluids.5.124301
6. De Leo A., Cutroneo L., Sous D. et al. Settling velocity of microplastics exposed to wave action. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021, 9 (2), 142. doi:10.3390/jmse9020142
7. Clark L.K., DiBenedetto M.H., Ouellette N.T., Koseff J.R. Dispersion of finite-size, non-spherical particles by waves and currents. *Journal of Fluid Mechanics*. 2023, 954, A3. doi:10.1017/jfm.2022.968
8. Forsberg P.L., Sous D., Stocchino A., Chemin R. Behaviour of plastic litter in nearshore waters: First insights from wind and wave laboratory experiments. *Marine Pollution Bulletin*. 2020, 153, 111023. doi:10.1016/j.marpolbul.2020.111023
9. Alsina J.M., Jongedijk C.E., van Sebille E. Laboratory measurements of the wave-induced motion of plastic particles: Influence of wave period, plastic size and plastic density. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2020, 125(12), e2020JC016294. doi:10.1029/2020JC016294
10. Dietrich W.E. Settling velocity of natural particles. *Water Resources Research*. 1982, 18(6), 1615–1626. doi:10.1029/WR018i006p01615
11. Zhiyao S., Tingting W., Fumin X., Ruijie L. A simple formula for predicting settling velocity of sediment particles. *Water Science and Engineering*. 2008, 1(1), 37–43. doi:10.1016/S1674-2370(15)30017-X
12. Khatmullina L., Isachenko I. Settling velocity of microplastic particles of regular shapes. *Marine Pollution Bulletin*. 2017, 114(2), 871–880. doi:10.1016/j.marpolbul.2016.11.024
13. Hazzab A., Terfous A., Ghennaim A. Measurement and modeling of the settling velocity of isometric particles. *Powder Technology*. 2008, 184(1), 105–113. doi:10.1016/j.powtec.2007.08.009
14. DiBenedetto M.H., Koseff J.R., Ouellette N.T. Orientation dynamics of nonspherical particles under surface gravity waves. *Physical Review Fluids*. 2019, 4(3), 034301, doi:10.1103/PhysRevFluids.4.034301
15. Guler H.G., Larsen B.E., Quintana O. et al. Experimental study of non-buoyant microplastic transport beneath breaking irregular waves on a live sediment bed. *Marine Pollution Bulletin*. 2022, 181, 113902. doi:10.1016/j.marpolbul.2022.113902
16. Jackson D.W.T., Cooper J.A.G., Del Rio L. Geological control of beach morphodynamic state. *Marine Geology*. 2005, 216(4), 297–314. doi:10.1016/j.margeo.2005.02.021
17. Stocchino A., De Leo F., Besio G. Sea waves transport of inertial micro-plastics: Mathematical model and applications. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2019, 7(12), 467. doi:10.3390/jmse7120467
18. Troitskaya Yu.I., Sergeev D.A., Kandaurov A.A. et al. Laboratory and theoretical modeling of air-sea momentum transfer under severe wind conditions. *Journal of Geophysical Research*. 2012, 117, C00J21. doi:10.1029/2011JC007778
19. OpenCV URL: <https://opencv.org> (Accessed 05.03.2023).
20. ALGLIB User Guide — Penalized regression spline. URL: <https://www.alglib.net/interpolation/leastquares.php> (Accessed 05.03.2023).
21. Longuet-Higgins M.S. Eulerian and Lagrangian aspects of surface waves. *Journal of Fluid Mechanics*. 1986, 173, 683–707. doi:10.1017/S0022112086001325
22. Grue J., Kolaas J. Experimental particle paths and drift velocity in steep waves at finite water depth. *Journal of Fluid Mechanics*. 2017, 810, R1. doi:10.1017/jfm.2016.726
23. Sudolsky A.S. Dynamic phenomena in reservoirs. *Leningrad, Gidrometeoizdat*, 1991. 263 p. (in Russian).
24. Santamaria F., Boffetta G., Afonso M.M. et al. Stokes drift for inertial particles transported by water waves. *Europhysics Letters*. 2013, 102(1), 14003. doi:10.1209/0295-5075/102/14003

## Об авторах

ИСАЧЕНКО Игорь Александрович, кандидат физико-математических наук, РИНЦ AuthorID: 907757, ORCID ID: 0000-0002-6810-9198, Scopus AuthorID: 57192427734, WoS ResearcherID: L-3402-2016, isatchenko@gmail.com

КРАЕВ Иван Михайлович, РИНЦ AuthorID: 1133945, ORCID ID: 0000-0003-3523-6681, Scopus AuthorID: 57205167268, WoS ResearcherID: AAB-8668-2022, ivankraevgorodec@yandex.ru

СЕРГЕЕВ Даниил Александрович, кандидат физико-математических наук, РИНЦ AuthorID: 133457, ORCID ID: 0000-0003-4910-3935, Scopus AuthorID: 6603887343, WoS ResearcherID: L-4569-2016, daniil@ipfran.ru