

Экспериментальное моделирование процесса переноса плавающих объектов в «мусорных островах»

А. А. Будников^{1,a}, П. В. Жарков^{1,b}, Ю. Д. Чашечкин^{2,c}

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

²Институт проблем механики имени А. Ю. Ишлинского РАН.

Россия, 119526, Москва, просп. Вернадского 101, корп. 1.

E-mail: ^aaa.budnikov@physics.msu.ru, ^bphysicmsu@mail.ru, ^cchakin@ipmnet.ru

Статья поступила 24.02.2012, подписана в печать 11.04.2012.

В лабораторной установке изучены движения полипропиленовых маркеров в составном вихре в качестве модели переноса мусора в океане. Показано, что при движении на поверхности вихря маркер вращается как вокруг центра вихря, так и вокруг собственной оси. Определены зависимости угловых скоростей вращения маркеров от расстояния до центра вихря, значения которых, при фиксированных внешних условиях зависят от размеров маркеров. Найдена сепаратриса, разделяющая области начальных положений, из которых маркер при дальнейшем движении смещается к центру вихря или к стенкам контейнера.

Ключевые слова: мусорные острова, составной вихрь, траектории перемещения твердотельных маркеров.

УДК: 550.3. PACS: 92.05.Bc.

Введение

Начиная с 1980-х гг. внимание общественности и научных кругов привлек факт увеличения количества дрейфующих пластиковых отходов в водах Мирового океана. Измерение концентрации пластика в поверхностных водах северной части Тихого океана [1] выявило повышение концентрации в областях, подвластных определенным океаническим течениям. В 1997 г. Чарльзом Муром было обнаружено огромное скопление пластика в Тихом океане в районе Северо-Тихоокеанской системы течений, названное «Great Pacific Garbage Patch». Площадь «Мусорного Тихоокеанского пятна», по разным оценкам, составляет от 700 тыс. до 15 млн км², а общая масса мусора превышает 100 млн т [2] и при этом постоянно увеличивается. Плавающий мусор представляет собой в основном мелкие куски пластика, концентрирующиеся в верхнем (до 30 м) слое воды (рис. 1) [3].

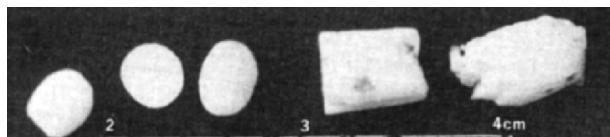


Рис. 1. Типичные частицы пластика в пробе из приповерхностного слоя загрязненной области

Впоследствии подобные скопления были обнаружены и в других океанах, в тех местах, где система течений образует устойчивые циркуляционные зоны. На сегодняшний день известно о пяти наиболее массивных скоплениях мусора: двух в Тихом, двух в Атлантическом и одном в Индийском океане [4, 5]. Для наблюдения за обнаруженными мусорными островами и изучения связанных с загрязнением проблем в 2009 г. создан «Институт пяти водоворотов» (5 Gyres Institute) [6].

Проблема исследования «мусорных островов» осложняется тем, что транспортные маршруты морских

судов проходят мимо этих районов, а наблюдения со спутника не представляются возможными из-за прозрачности пластика, мелких размеров пластиковых частиц и из-за того, что большинство частиц находится под поверхностью воды. В то же время непредсказуемое поведение «мусорного пятна» представляет большую опасность для прибрежных территорий.

Теоретическое описание переноса мусора сильно осложнено вследствие большого числа факторов, оказывающих влияние на данный процесс. В данной ситуации лабораторное моделирование, позволяющее контролировать внешние параметры, может помочь в оценке влияния различных факторов на динамику как самого мусорного острова, так и на динамику элементов, его составляющих.

Цель настоящей работы — экспериментальное изучение динамики плавающих частиц на поверхности составного вихря, моделирующего вихревую систему со стоком в центре и притоком жидкости на периферии.

1. Лабораторная установка

Эксперименты проведены на стенде ВТК Уникальной установки УСУ «Гидрофизический комплекс для моделирования гидродинамических процессов в окружающей среде и их воздействия на подводные технические объекты, а также распространения примесей в океане и атмосфере (ГФК ИПМехРАН)».

Схема лабораторной установки приведена на рис. 2. Основой установки является рабочая ячейка — цилиндр I высотой 70 см и внутренним диаметром 29.4 см. Для уменьшения оптических искажений при фотографировании течений цилиндр помещался внутрь открытого параллелепипеда размерами 64 × 45 × 70 см. в металлической раме 2. Сквозь геометрический центр контейнера через уплотнительный сальник проходит вал, соединенный напрямую с электромотором 6,

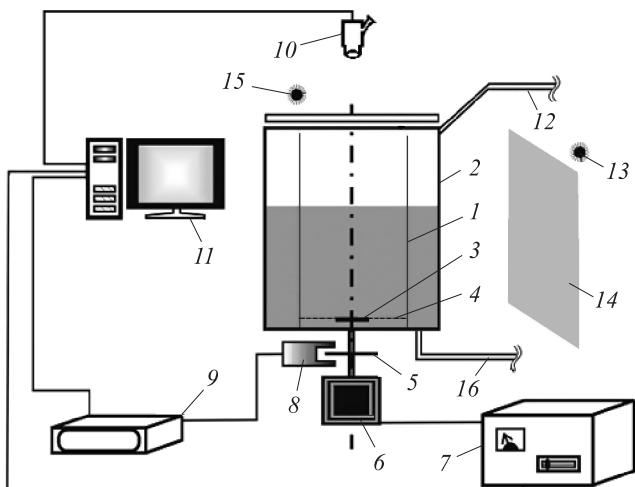


Рис. 2. Схема лабораторной установки

частота вращения которого может варьироваться в диапазоне от 200 до 2500 об/мин.

Выбор частоты вращения, которая в данных опытах поддерживалась постоянной $\Omega = 650$ и 900 об/м, осуществляется блоком управления 7. На вал устанавливался активатор 3 — гладкий диск диаметром 5 см и толщиной 2 мм. Верхняя кромка диска располагалась на расстоянии 2 см от дна бассейна. На уровне верхней кромки было установлено фальшдно 4. Для определения угловой скорости вращения диска-активатора, на вале электродвигателя расположен вспомогательный диск с прорезями 5. Угловая скорость вращения диска определялась при помощи частотомера 9, регистрирующего показания оптического датчика 8.

Видеорегистрация картины течения проводилась с помощью цифровой видеокамеры 10 модели Panasonic NV-MX500, расположенной вертикально над центром бассейна. Электронный видоискатель, использующийся в камере, позволяет направить ось объектива камеры точно по центральной оси бассейна. Управление экспериментом и регистрация данных велись с помощью персонального компьютера 11. Для наполнения и освещения бассейна используется гидравлическая система 12. Освещение области течения проводится источником белого света 13 с рассеивающим экраном 14 или лампой ультрафиолетового света 15.

Перед началом эксперимента установка заполнялась дегазированной водопроводной водой. Глубина слоя жидкости в данных экспериментах составляла 30 см. Условия освещения (угол и высота расположения прожектора) подбирались так, чтобы при дальнейшей обработке изображения все детали свободной поверхности жидкости были видны и различимы. На поверхность жидкости помещался набор плавучих маркеров разной высоты, приведенный на рис. 3. В качестве маркеров применялись полипропиленовые пробирки диаметром 9 мм, утяжеленные (для вертикальной ориентации в воде) свинцовыми дробинками. На крышки маркеров были нанесены специальные метки, позволяющие при наблюдении сверху различать маркеры между собой и отслеживать их ориентацию в бассейне.

Каждый новый эксперимент начинался после затухания всех видимых движений в бассейне. Перед началом



Рис. 3. Маркеры, используемые в эксперименте

видеозаписи юстировка камеры проводилась при помощи специальной системы меток. Видеозапись движения маркеров начиналась после того как движение на поверхности принимало установившийся характер и продолжалось в течение примерно 5 мин.

Обработка снятого материала в оболочке Adobe Photoshop позволяла проследить траектории маркеров и их угловое положение, угловое положение метки на крышке, а также измерить расстояние от центра маркера до центра каверны, обозначающего центр вращения поверхностного слоя жидкости R , угловую скорость вращения маркера вокруг центра каверны Ω , собственную частоту вращения маркера вокруг своей оси ω .

При обработке стоп-кадры с перемещающимся по поверхности бассейна маркерами накладывались один на другой с целью регистрации перемещения центра маркера и угла поворота метки.

2. Результаты экспериментов

На рис. 4 приведен пример траекторий одиночного маркера высотой 2.5 см. Светлой точкой обозначено начальное положение маркера, который смещается к центру (рис. 4, а). Круговой линией обозначена сепаратриса, которая разделяет области начального положения, определяющие направление преимущественного перемещения маркера к центру вихря или к стенкам контейнера. Траектории движения маркеров показали,

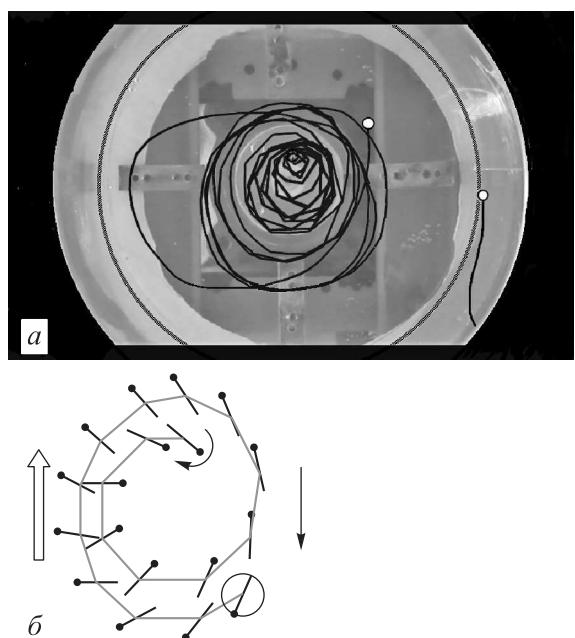


Рис. 4. Траектории движения одиночного маркера (а) и схема движения маркера на 7-м и 8-м витках (б)

что центр выхода вихря на поверхность жидкости, как правило, оказывался смещенным относительно центра симметрии контейнера.

Детали перемещения маркера приведены на рис. 4, б для 7-го и 8-го витков. Здесь большой стрелкой обозначено направление вращения диска и жидкости

в контейнере вокруг вертикальной оси в целом. Тонкая стрелка показывает направление перемещения маркера, начальное положение которого обозначено серой окружностью с диаметром, равным диаметру маркера в масштабе траектории. Направление вращения маркера вокруг собственной оси иллюстрирует кривая стрелка

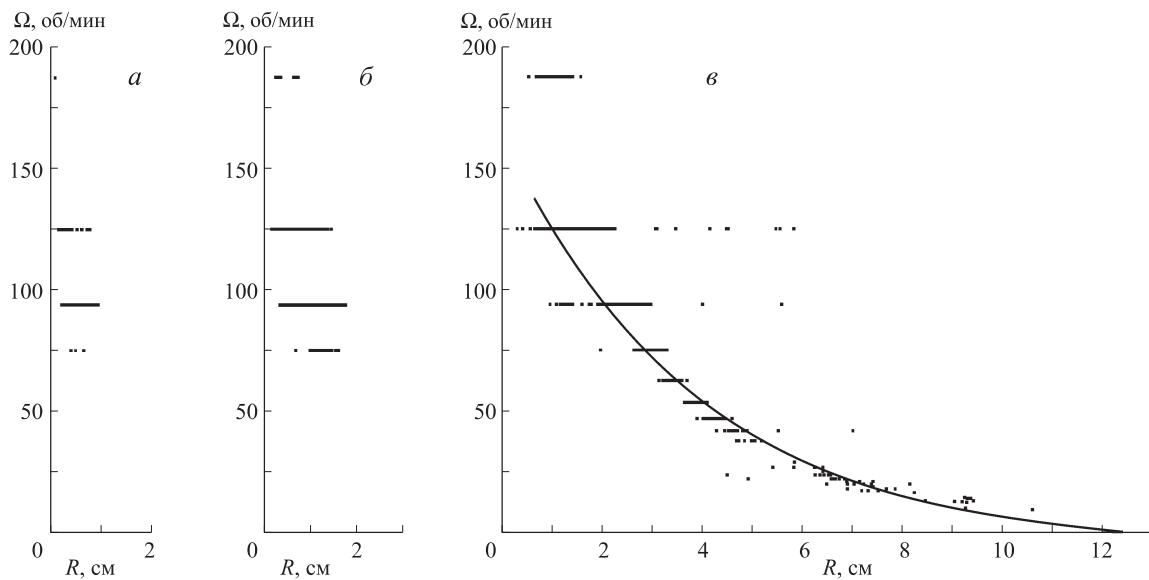


Рис. 5. Распределение угловой скорости Ω маркера высотой 2.5 см в зависимости от расстояния между центром маркера и центром вихря R . Скорость вращения активатора: 500 об/мин (а), 650 об/мин (б) и 900 об/мин (в)

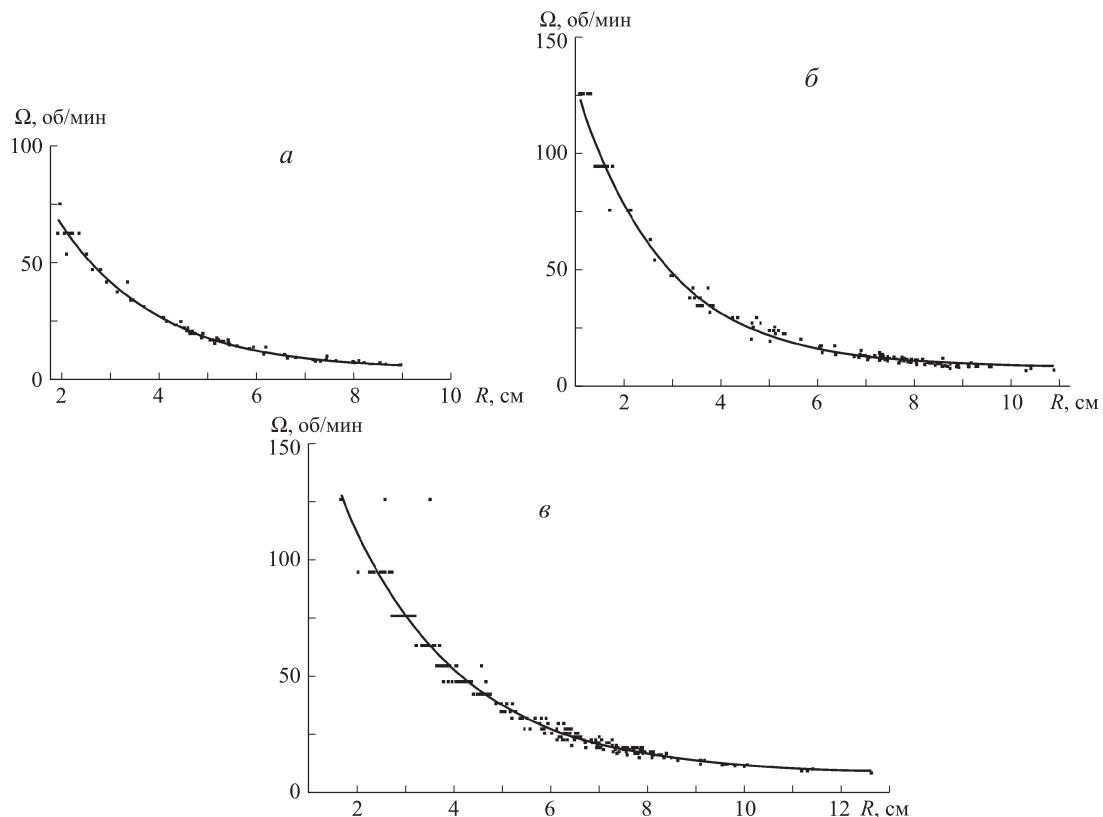


Рис. 6. Распределение угловой скорости Ω маркера высотой 3 см в зависимости от расстояния между центром маркера и центром вихря R . Скорость вращения активатора: 500 об/мин (а), 650 об/мин (б) и 900 об/мин (в)

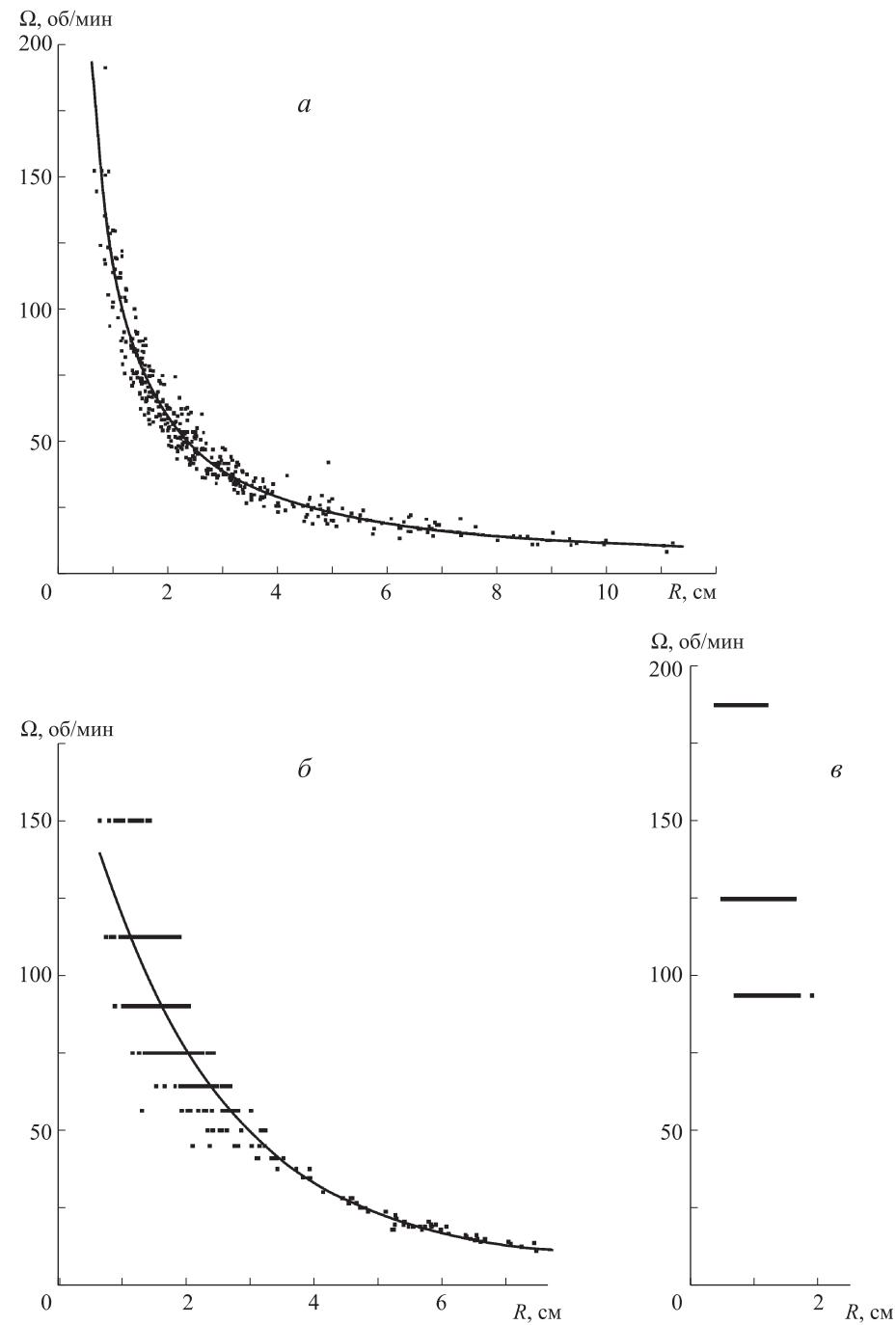


Рис. 7. Распределение угловой скорости Ω маркера высотой 4 см в зависимости от расстояния между центром маркера и центром вихря R . Скорость вращения активатора: 500 об/мин (*а*), 650 об/мин (*б*) и 900 об/мин (*в*)

Значения коэффициентов экспоненциальной аппроксимации $\Omega(R)$

Скорость вращения диска-активатора	500 об/мин			650 об/мин			900 об/мин		
Высота маркера, см	2.5	3	4	2.5	3	4	2.5	3	4
Ω_1	—	164 ± 7	217 ± 5	—	209 ± 5	182 ± 4	170 ± 4	241 ± 10	—
Ω_0	—	4.3 ± 0.9	18.7 ± 0.8	—	8.0 ± 0.6	7.0 ± 3.1	6.3 ± 3.5	8.0 ± 1.4	—
R_1	—	2.04 ± 0.09	1.2 ± 0.03	—	1.81 ± 0.05	2.06 ± 0.12	3.85 ± 0.28	2.36 ± 0.11	—

около последней точки 8-го витка. Все угловые скорости в данном эксперименте антициклонические (вращение по часовой стрелке). На приводимом отрезке угловые скорости вращения не являются постоянными и составляют на 7-м витке $\Omega = 8.6$ об/мин, $\omega = 7.5$ об/мин, $\omega/\Omega = 0.9$ и $\Omega = 20$ об/мин, $\omega = 10.8$ об/мин, $\omega/\Omega = 0.5$ на 8-м витке.

С началом движения набор маркеров, помещенный примерно на расстояние половины радиуса ячейки, начинал перемещаться к центру создаваемого в контейнере вихря. Попав в центр, маркеры начинали взаимодействовать друг с другом, что приводило к периодическим «вылетам» того или иного маркера на некоторое расстояние от центра. При этом помимо вращения маркеров вокруг общего центра наблюдалось вращение маркеров вокруг собственной оси.

Одной из наиболее важных характеристик движения маркеров является угловая скорость вращения маркера относительно точки максимального углубления жидкости (центра вихря) Ω . Распределение угловой скорости Ω в зависимости от расстояния между центром маркера и центром вихря R представлено на рис. 5–7. Измерения были проведены для трех маркеров разной длины (2.5 см — рис. 5, 3 см — рис. 6, 4 см — рис. 7) при трех различных частотах вращения диска-активатора (500 об/мин (a), 650 об/мин (б) и 900 об/мин (в)). Проведенный эксперимент показал, что траектории маркеров разных размеров отличаются друг от друга при различных частотах.

Так, маркер высотой 2.5 см при частотах вращения диска-активатора 500 и 650 об/мин на всем протяжении опыта находился у центра вращения жидкости, удаляясь от него не более чем на 2 см. Однако с увеличением скорости оборотов диска до 900 об/мин, наблюдаются «вылеты» маркера, которые достигают расстояния до 11 см от центра, что составляет примерно 2/3 радиуса контейнера.

Распределение расстояний от центра маркера высотой 3 см в ходе эксперимента носило более равномерный характер, но чаще всего маркер находился на расстоянии, равном примерно половине радиуса контейнера.

Для маркера высотой 4 см наблюдалась обратная ситуация: при частотах 500 и 650 об/мин маркер совершал периодические «вылеты», с увеличением частоты вращения активатора до 900 об/мин маркер переместился в центр вихря и оставался в нем.

Распределения угловой скорости маркеров $\Omega(R)$ во всех случаях, кроме случая постоянного нахождения маркера в центре вихря, можно аппроксимировать экспоненциальной зависимостью $\Omega(R) = \Omega_1 \exp(-R/R_1) + \Omega_0$. Значения коэффициентов для различных высот и угловых скоростей диска-активатора представлены в таблице.

Сдвиг скорости в вихре формирует касательные напряжения, которые закручивают маркер вокруг собственной оси. На рис. 8 приведены распределения собственных скоростей вращения маркеров высотой 3 и 4 см при частоте вращения диска-активатора 650 об/мин.

Эти распределения также аппроксимируются зависимостью $\omega(R) = \omega_1 \exp(-R/R_1) + \omega_0$ с коэффициентами

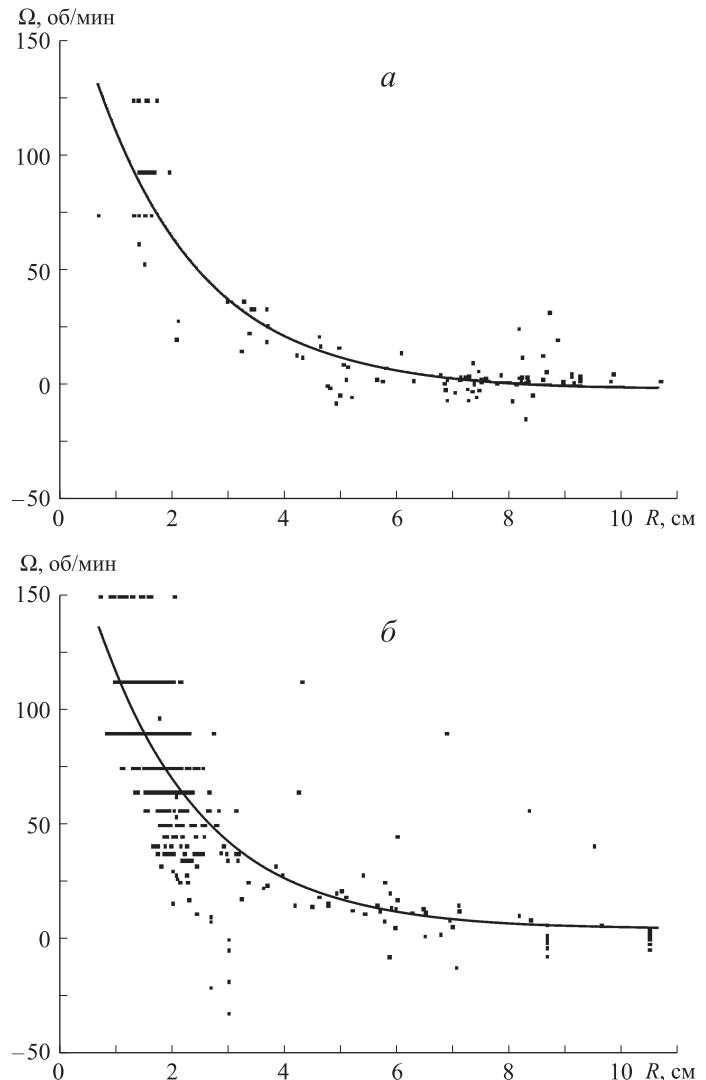


Рис. 8. Распределение собственной угловой скорости вращения маркера ω в зависимости от расстояния между центром маркера и центром вихря R . Скорость вращения активатора 650 об/мин. Высота маркера: 3 см (а) и 4 см (б)

$\omega_0 = -0.8 \pm 3.0$, $\omega_1 = 191.3 \pm 18.3$, $R_1 = 1.91 \pm 0.26$ и $\omega_0 = 4.6 \pm 3.6$, $\omega_1 = 192.7 \pm 8.6$, $R_1 = 1.86 \pm 0.15$ соответственно, совпадающих в пределах погрешности. На обеих зависимостях прослеживаются волнобразные отклонения собственных скоростей вращения от экспоненциальной зависимости вызванные, по-видимому, спиральными волнами, присутствующими на поверхности жидкости [7].

Выводы

1. Выполненный цикл опытов по изучению траекторий твердотельных маркеров в составном вихре при фиксированных значениях глубины жидкости и скорости вращения диска-активатора позволил определить кинематические параметры перемещений.

2. Траектория движения маркера зависит от его начального положения. Существует область, при помещении в которую маркер будет двигаться не к центру вихря, а в сторону стенок контейнера. При движении

маркер вращается как вокруг центра, так и вокруг собственной оси.

3. Мгновенный центр вращения картины течения смещен относительно центра симметрии контейнера.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Минобрнауки, (госконтракт 16.518.11.7059) на стенде ВТК УСУ «ГФК ИПМех РАН».

Список литературы

1. Day R.H., Shaw D.G., Ignell S.E. // Final Report to US Department of Commerce, National Marine Fisheries Service, Auke Bay Laboratory. Auke Ba. AK. 1988. P. 247.
2. Moore C. // Nat. Hist. Mag. 2003. **112**, N 9.
3. Carpenter E.J., Smith K.L. // Science. 1972. **175**. P. 1240.
4. Lavender L.K., Morét-Ferguson S., Maximenko N.A. et al. // Science. 2010. **329**. P. 1185.
5. Barnes D.K.A. // The Effects of Human Transport on Ecosystems: Cars and Planes, Boats and Trains / Ed. by J. Davenport, J. L. Davenport. Dublin: Royal Irish Academy, 2004. P. 193.
6. http://5gyres.org/media/Flotsam_in_the_Indian_Ocean.pdf
7. Будников А.А., Степанова Е.В., Зырянов Ф.Б. // Физические проблемы экологии (Экологическая физика): Сб. науч. тр. / Под ред. В. И. Трухина, Ю. А. Пирогова, К. В. Показеева. М., 2005. № 13. С. 44.

Modeling of «garbage island» formation in the vortex ocean

A. A. Budnikov^{1,a}, P. V. Zharkov^{1,b}, Yu. D. Chashechkin^{2,c}

¹Department of Marine and Inland Water Physics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

²A. Yu. Ishlinsky Institute of Problems in Mechanics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119526, Russia.
E-mail: ^aaa.budnikov@physics.msu.ru, ^bphysicmsu@mail.ru, ^cchakin@ipmnet.ru.

The polypropylene markers set movement in composite vortex in a laboratory setting studied. Trajectories of the markers which parameters, under the fixed external conditions, depend on their initial position are tracked. At movement the marker rotates both round the whirlwind center, and round own axis, corresponding angular speeds are defined. The separatrix, dividing areas of initial positions from which the marker at the further movement is displaced to the center of a whirlwind or to container walls was found.

Keywords: garbage islands, compound vortex, solid-state markers movement trajectories.

PACS: 92.05.Bc.

Received 24 February 2012.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 4(2012).

Сведения об авторах

1. Будников Андрей Александрович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: aa.budnikov@physics.msu.ru.
2. Жарков Павел Витальевич — студент; тел.: (495) 939-16-77, e-mail: physicmsu@mail.ru.
3. Чашечкин Юлий Дмитриевич — докт. физ.-мат. наук, зав. лабораторией, профессор; тел.: (495) 434-01-92; e-mail: chakin@ipmnet.ru.