

Перенос маркеров в установившемся составном вихре

А. А. Будников^{1,a}, Ю. Д. Чашечкин^{2,b}

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

² *Институт проблем механики РАН. Россия, 119526, Москва, просп. Вернадского, д. 101, корп. 1.*
E-mail: ^a *aa.budnikov@physics.msu.ru*, ^b *chakin@ipmnet.ru*

Статья поступила 21.02.2014, подписана в печать 05.03.2014.

В лабораторной установке исследованы характеристики перемещения твердотельных маркеров по поверхности установившегося составного вихря. Вихрь генерировался в цилиндрическом контейнере, заполненном водой, при помощи диска, вращающегося на дне. Визуализированы траектории перемещения твердотельных маркеров, получено радиальное распределение угловой скорости обращения маркера относительно центра контейнера, а также связь частот собственного вращения маркера и вращения относительно центра контейнера для полипропиленовых маркеров двух типов — плоского квадрата и объемной мини-пробирки.

Ключевые слова: мусорные острова, составной вихрь, траектории перемещения твердотельных маркеров.
УДК: 550.3. PACS: 92.05.Bc.

Введение

Компактные вихри и вихревые системы часто наблюдаются в атмосфере и гидросфере, активно используются в промышленных технологиях.

Общепризнанными индикаторами вихревых течений в океане служат спиральные структуры в картинах распределений водорослей, плавающего мусора или льда [1]. В ходе дрейфа плавающие предметы сталкиваются между собой и разрушаются. Обломки плавучих материалов, захваченные морскими течениями, переносятся на большие расстояния и скапливаются в центрах глобальных океанических водоворотов. В последние годы во всех океанах обнаружены «мусорные острова» — обширные скопления плавучих материалов площадью в миллионы квадратных километров, состоящие в основном из обломков пластмасс размером от нескольких дециметров до долей миллиметров. На крупных обломках развиваются нетипичные для данного региона биосообщества, мелкие частицы в высоких концентрациях представляют угрозу для всех обитателей морской среды [2].

Разрушительное действие интенсивных вихрей в атмосфере — торнадо и ураганов, наносящих значительный материальный ущерб, усиливается ударным действием захваченных предметов [3]. Скоротечность, непредсказуемость местоположения, высокая скорость и пространственная неоднородность интенсивных вихревых систем затрудняет изучение их свойств в естественных условиях.

Эффект распределения частиц в вихревых течениях по размерам и составу составляет основу многих промышленных технологий: очистки жидкостей от примесей и газов, сепарации веществ, обогащения руд и сушки материалов. В последние годы развиваются вихревые технологии тонкого помола твердых материалов [4] и высокопроизводительных физико-химических процессов.

В дополнение к наблюдениям в природных условиях и промышленных установках вихревые течения изучаются теоретически и моделируются в лабора-

торных условиях. Результаты модельных исследований динамики вихрей в чистых жидкостях или газах и процессов переноса вещества в различных вихревых течениях приведены в большом числе оригинальных работ, обзоров и монографий [5]. В опытах изучаются течения, которые создаются различными телами (индукторами), вращающимися в свободном пространстве или в замкнутых оболочках цилиндрической, сферической, эллипсоидальной, тороидальной и более сложной формы. В силу простоты и универсальности наибольшее распространение получили стенды, в которых вихри создаются вращающимся диском в цилиндрическом контейнере, полностью или частично заполненным жидкостью [5]. Рассчитанная форма деформированной свободной поверхности составного вихря в контейнере удовлетворительно согласуется с измерениями [6].

Проведенные опыты показали, что характер переноса маркирующего вещества по поверхности составного вихря зависит от многих факторов: фазового состояния (жидкое или твердое тело), размеров и формы, начального положения маркера, а также от положения и скорости вращения индуктора.

Пятно окрашенной смешивающейся жидкости в камере на поверхности вихря вытягивается в расщепленные на волокна спиральные рукава [7]. Округлое масляное пятно на поверхности составного вихря также деформируется в тело сложной формы с несколькими спиральными рукавами, ориентированными навстречу направлению базового вращения жидкости [8].

Практический интерес представляет детальное изучение поведения твердотельных маркеров в вихревых течениях, использующихся во многих традиционных и современных промышленных технологиях, включая детонационные [9]. Распространенные методы измерений скорости течений (в частности, лазерные анемометрические (LDA) и трассерные (PIV)) основаны на регистрации скорости твердых частиц в предположении «пассивности» примесей, которые без скольжения следуют за жидкостью. В то же время известно, что на свободные тела в течении со сдвигом действуют

не только силы (сопротивления, сноса, подъемная), но и крутящий момент, вызывающие их одновременное смещение и вращение [10]. Эффекты энергичного сближения и ударных столкновений используются в технологиях измельчения твердых частиц в «вихревых мельницах» [4].

Менее детально исследован перенос в вихрях макроскопических тел, скорость движения которых зависит не только от формы, но и от относительного положения центров масс и плавучести [11]. В настоящей работе впервые детально прослежена динамика движения на поверхности составного вихря твердотельных маркеров двух видов — объемного и плоского.

Постановка эксперимента

Составной вихрь создавался в цилиндрическом контейнере диаметром 29.5 см, который для уменьшения оптических искажений картины течения размещался внутри прозрачного прямоугольного бассейна. Бассейн и контейнер частично заполнялись дегазированной водопроводной водой. Составной вихрь создавался равномерно вращающимся диском диаметром 5.5 или 15 см, верхняя плоскость которого совпадала с поверхностью фальш-дна в бассейне. Диск устанавливался на валу электромотора, частота вращения которого, зарегистрированная оптическим датчиком, составляла $\Omega_d = 3-5$ об/с.

На поверхность жидкости с установившимся вихревым течением помещались один или несколько маркеров двух типов — объемные и плоские (рис. 1). Объемные маркеры — полипропиленовые минипробирки длиной от 2 до 5 см, нижняя часть которых имела коническую форму с плавно скругленным концом. Диаметр конуса плавно увеличивается от 0.6 до 1 см, высота составляла 1.8 см. Примыкающая к конусу цилиндрическая часть минипробирки заканчивалась плоской крышкой эллиптической формы (большая ось 1.6 см, малая ось 1.3 см) и толщиной 0.1 см. В зависимости от размеров минипробирки высота ее цилиндрической части лежала в диапазоне от 0.1 до 2.9 см.

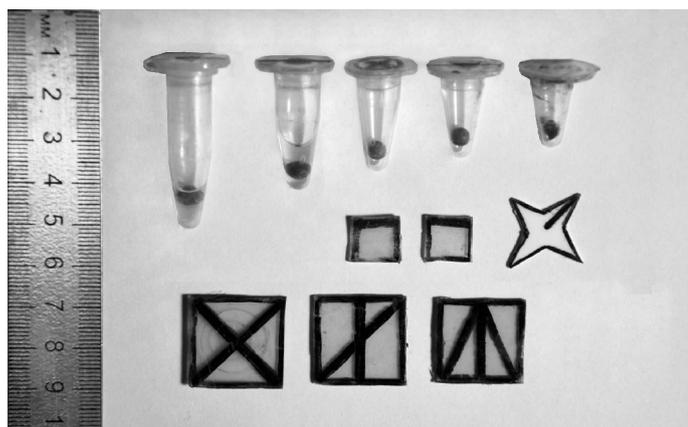


Рис. 1. Маркеры

В минипробирку помещалась свинцовая дробинка, вес которой подбирался из условия расположения верхней плоскости крышки на поверхности воды. Размещение центра масс под центром плавучести обеспечивало

устойчивость вертикального положения минипробирки в вихревом течении.

Положение плоского маркера нейтральной плавучести — квадрата с длиной стороны 1 см или четырехлучевой звезды того же размера, вырезанных из полиэтиленового листа толщиной 1 мм, стабилизировалось действием сил поверхностного натяжения (рис. 1).

Видеорегистрация картины течения проводилась с помощью цифровой видеокамеры Panasonic NV-MX500, которая располагалась вертикально над центром бассейна. Электронный видискатель камеры позволял оперативно регулировать положение линии визирования, которая в данных опытах направлялась по центральной оси контейнера. Положение осветителей подбиралось из условия устойчивой регистрации индикатора ориентации маркера. Управление экспериментом и регистрация данных велась с помощью персонального компьютера (более подробно методика эксперимента приведена в [7, 8]).

При обработке снятого видеоматериала определялось изменение положения маркера на поверхности вихря со временем с погрешностью ± 0.05 см. Временная погрешность определялась скоростью съемки камеры и составляла 0.04 с.

Обсуждение результатов

Предварительные визуальные наблюдения показали, что независимо от формы все твердотельные маркеры, и объемные, и плоские, двигались по спиральной траектории к центру контейнера. Все маркеры помимо обращения вокруг центра вихря вертелись вокруг оси, расположенной внутри тела. В опытах совпадали направления угловых скоростей движения всех тел — вращения диска, квадрата или минипробирки вокруг оси контейнера, вращения маркеров относительно собственной оси. В данных опытах диск-индуктор, жидкость и маркеры вращались против часовой стрелки.

Типичная траектория движения квадратного маркера со стороной ребра $l_m = 1$ см в составном вихре (глубина жидкости $H = 40$ см, диаметр диска $D = 5.5$ см, угловая скорость вращения диска $\Omega_d = 8$ об/с) — связанная последовательность положений его центра — приведена на рис. 2, а. Обращает на себя внимание нерегулярность расположения отдельных витков и расстояний между угловыми точками, каждой из которых соответствует собственное время прохождения центра пластинки. Последовательность изображений маркера в начале траектории иллюстрирует самовращение (верчение), темной стрелкой отмечено его направление. Направление окружной скорости жидкости отмечено светлой стрелкой в левом углу изображения.

Минипробирка, внесенная в установившееся течение, попадала в центр составного вихря в течение 1–3 мин. В ходе опыта пробирка иногда совершала возвратное радиальное движение и начинала удаляться от центра вихря. В течение одного — двух оборотов генеральное направление движения восстанавливалось, маркер достигал центра каверны и продолжал вращаться вокруг центра вихря, участвуя в прецессии ядра. Радиальная компонента скорости при этом составляла 0.2 см/с в начале движения и увеличивалась по мере приближения маркера к центру до 0.6 см/с.

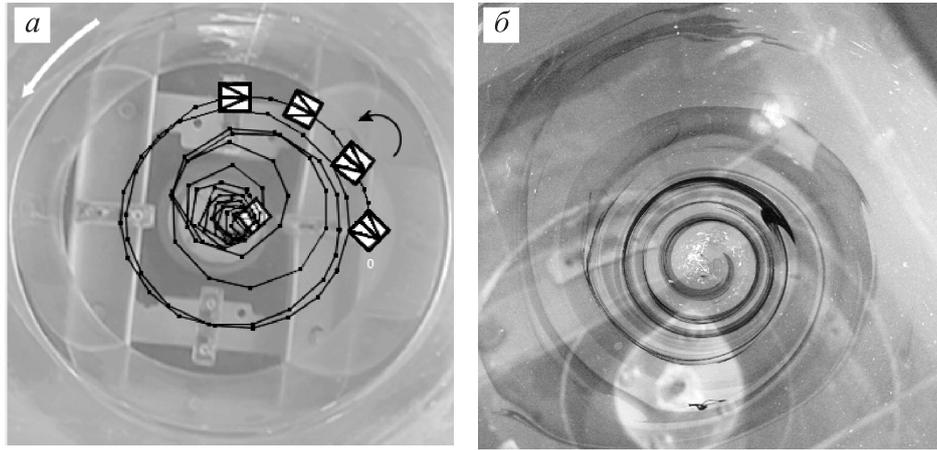


Рис. 2. Поведение маркеров на поверхности составного вихря ($H = 40$ см): *a* — последовательность положений плоского квадрата ($D \approx 5.5$ см, $\Omega_d = 8$ об/с, $l_m = 1$ см); *b* — спиральные рукава из капель чернил ($D = 15$ см, $\Omega_d = 3$ об/с) [7]

Плоский маркер двигался более регулярно. Скорость радиального перемещения также возрастала от 0.2 до 0.6 см/с, но в силу отсутствия возвратных движений маркер быстрее оказывался в центре вихря.

Окружная скорость центров маркеров меняется немонотонно по радиусу. Во внешней части вихря на расстояниях от 2 до 9 см от оси цилиндра усредненная по всем опытам окружная скорость центра маркера v_ϕ убывает с удалением с коэффициентом 0.2 с^{-1} . Во внутренней части течения окружная скорость v_ϕ быстро увеличивается с коэффициентом 1.5 с^{-1} .

Несколько маркеров на поверхности иногда двигались независимо к центру течения, иногда сцеплялись и образовывали вращающиеся вокруг центра контейнера и одновременно совместно вертящиеся кластеры, иногда соударялись и разлетались в разные стороны.

В центре вихря маркер вертелся только вокруг своей оси.

Собственное вращение маркера возмущает гладкое течение жидкости в его окрестности, на которую он воздействует как дополнительный вихреисточник. Вносимое возмущение имеет сложный характер, поскольку одновременно одни точки внешней кромки маркера переходят из областей с большим значением окружной скорости в области с меньшим значением, а другие — наоборот, и вследствие граничного условия прилипания переносят жидкие объемы, обладающие собственной скоростью.

Для иллюстрации различия переноса твердотельных и жидких маркеров на рис. 2, б приведена картина распространения окрашенной жидкости из первоначально круглого пятна, образовавшегося после падения капли чернил. Жидкость с чернилами увлекается потоком и вытягивается в растущий со временем окрашенный спиральный рукав. Одновременно область первичного контакта жидкого маркера скользит по поверхности жидкости и оставляет окрашенный след, внешний край которого медленно продвигается навстречу основному течению (рис. 2, б). Жидкий маркер окрашивает всю траекторию, ее различным точкам на рис. 2, б соответствует одно и то же время.

Трехмерный характер течения в каждой точке потока проявляется в трансформации пятна чернил в си-

стему окрашенных волокон спиральной формы, разделенных полосками чистой жидкости. На протяженных гладких нитевидных спиралах — типичных элементах в картине распределения примесей в вихревых течениях, наблюдаемых и в лабораторных [7], и в морских условиях [1, 2], — не отмечаются признаки вращения относительно центра линии, типичные для траекторий, описываемых кромкой твердотельного маркера.

Распределение угловых скоростей окружного движения центра двух типов маркеров — минипробирки и квадрата — вокруг оси вихря Ω приведено на рис. 3. Минимальное значение угловой скорости Ω наблюдается на периферии течения, максимальное — в его центре, где находится ядро вихря. Приведенные данные для минипробирок аппроксимируются зависимостями вида $\Omega_p = A_p \cdot R^\beta$; $A_p = 2.9 \pm 0.2$; $\beta = -1.24 \pm 0.06$; $[\Omega_p] = \text{с}^{-1}$; $[R] = \text{см}$ и для плоских маркеров $\Omega_s = A_s \cdot e^{-\gamma R} + C_s$; $A_s = 2.26 \pm 0.04$; $\gamma = 0.29 \pm 0.03$; $C_s = -0.08 \pm 0.06$. Таким образом, в одном и том же течении значения угловой скорости обращения различных маркеров вокруг центра вихря, также как и частоты собственного вращения (верчения), зависят от их форм и размеров.

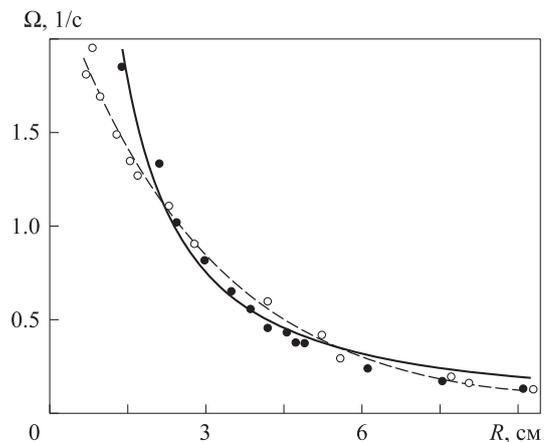


Рис. 3. Радиальное распределение угловой скорости обращения маркера относительно центра контейнера ($H = 40$ см, $D = 5.5$ см, $\Omega_d = 8$ об/с): светлые кружки — минипробирка; черные кружки — квадратная пластинка

Индивидуальные особенности движения маркеров выражены и на графиках зависимости частоты вращения ω от частоты обращения маркера Ω вокруг центра вихря, которые аппроксимируются степенными зависимостями вида $\omega_p = A_p \Omega_p^{\beta_1}$; $A_p = 0.64 \pm 0.02$; $\beta_1 = 1.46 \pm 0.06$ для микропробирки и $\omega_s = A_s \Omega_s^{\beta_2}$, $A_s = 0.48 \pm 0.3$; $\beta_2 = 2 \pm 0.1$ для плоского маркера (рис. 4).

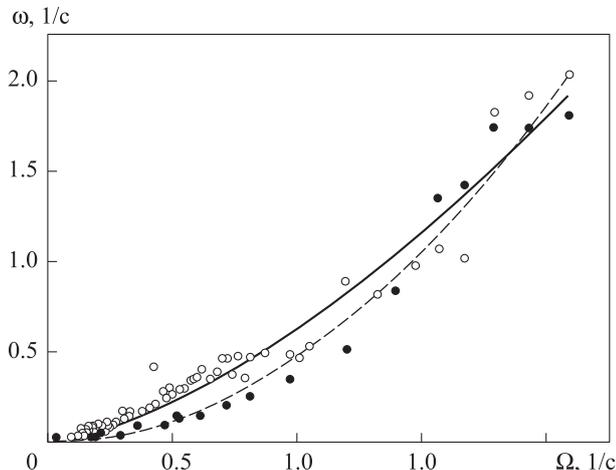


Рис. 4. Связь частот собственного вращения маркера и вращения относительно центра контейнера ($H = 40$ см, $D = 5.5$ см, $\Omega_d = 8$ об/с): светлые кружки — микропробирка; черные кружки — квадратная пластинка

Универсальный характер одновременного вращения и вращения свободного твердого тела в вихревом течении впервые был отмечен Декартом: «Так, например, можно полагать, что Бог разделил всю материю... на огромное число мелких частей, движущихся не только каждая вокруг собственного центра, но и все вместе вокруг центра S, а все частицы в пространстве AEV двигались подобным же образом вокруг центра FI, так же вращались и остальные. Частицы образовали таким путем столько вихрей, сколько ныне существует в мире светил (впредь я буду употреблять слово “вихрь”»

Marker transfer in a settled composite vortex

A. A. Budnikov^{1,a}, Yu. D. Chashechkin^{2,b}

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

²Institute of Problems of Mechanics, Russian Academy of Sciences, Moscow 119526, Russia.

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

The characteristics of the motion of solid-body markers over a settled composite vortex surface were studied using a laboratory apparatus. The vortex was generated in a cylindrical container filled with water using a rotating disc on the container bottom. The paths of solid-body markers were visualized. The radial distribution of the angular velocity of marker revolution around the container center was obtained. A relationship between eigenrotation frequencies and rotation around the container center occurred for two types of polypropylene markers (a flat square plate and a voluminous small tube).

Keywords: plastic island, composite vortex, solid-body marker paths.

PACS: 92.05.Bc.

Received 20 January 2014.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 3(2014).

Сведения об авторах

1. Будников Андрей Александрович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: aa.budnikov@physics.msu.ru.

2. Чашечкин Юлий Дмитриевич — доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. лабораторией; тел.: (495) 434-01-92; e-mail: chakin@ipmnet.ru.

для обозначения всей материи, вращающейся таким образом вокруг каждого из подобных центров» [12].

Заключение

Одновременное вращение твердотельного маркера вокруг центра вихря и верчение вокруг собственной оси может как стабилизировать траекторию движения, так и вызвать неожиданные броски, ускорения и замедления даже в установившемся вихревом течении. Неоднородности перемещения в данных опытах оказались более выражены у объемного маркера.

Работа выполнена на установке ВТК комплекса УСУ «ГФК ИПМех РАН», при частичной финансовой поддержке Российской академии наук (Программа Президиума РАН П-23 «Фундаментальные проблемы океанологии — физика, химия, биология, геология») и РФФИ (грант № 12-01-00128).

Список литературы

1. Eriksen M. // *Algalita Marine Research Foundation*. 2012. **148**. P. 1.
2. *Thin sea ice make swirls in East Greenland*. 2012.
3. Наливкин Д.В. Ураганы, бури и смерчи. Л., 1969.
4. Быковский Ф.А., Ведерников Е.Ф. // ПМТФ. 2000. **41**, № 1. С. 41.
5. Алексеенко С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. Новосибирск, 2003.
6. Чашечкин Ю.Д., Кистович А.В. // Доклады РАН. 2010. **432**, № 1. С. 50.
7. Степанова Е.В., Чашечкин Ю.Д. // Доклады РАН. 2009. **423**, № 4. С. 474.
8. Чаплина Т.О., Чашечкин Ю.Д., Степанова Е.В. // Доклады РАН. 2010. **432**, № 2. С. 184.
9. Быковский Ф. А., Ждан С.А., Ведерников Е.Ф., Жолобов Ю.А. // *Горение твердого топлива: Доклады VIII Всерос. конф. с междунар. участием*. Новосибирск, 2012.
10. Sadhal S.S., Ayyaswamy P.S., Chung J.N. Transport Phenomena with Drops and Bubbles. N. Y., 1997.
11. Фабер Т.Е. Гидроаэродинамика. М., 2001 (Faber T.E. Fluid Dynamics for Physicists. Cambridge, 1997).
12. Декарт Р. Первоначала философии: Соч. в 2 т. Т. 1. М., 1989.