Механика

Механика жидкости, газа и плазмы

Будников А.А., *кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник*
Показеев К.В., *доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой*
Чаплина Т.О., *кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник*
(Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова)

ДВИЖЕНИЕ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ МАРКЕРОВ В СОСТАВНОМ ВИХРЕ

Введение

Визуализация течения жидкости, определение его гидродинамических характеристик, в частности, скорости, путем внесения в течение различных маркирующих предметов были и остаются важными задачами для исследователей. Так, например, основной современный массив данных о течениях в Мировом Океане получен путем наблюдения за дрифтерами, передающими свои координаты в центры сбора таких данных [1]. Однако, помещаемые в движущуюся жидкость различные объекты ведут себя по-разному в силу присущих им физических и химических свойств. Перемещение твердотельного объекта, особенно в вихревом течении, осложняется наличием сдвига скоростей на его границах, благодаря чему твердотельный объект помимо своего основного движения вокруг центра вихря начинает вращаться вокруг своей собственной оси.

Развитие и совершенствование технологий и методов дистанционного зондирования позволяет получать все больший объем данных о распределении в Мировом океане физико-химических параметров и картины распространения различного рода примесей, часто имеющих в своей структуре спиральные элементы, возникающие из-за взаимодействия с повсеместно встречающимися вихревыми структурами [2].

Из-за значительных трудностей, связанных с наблюдением за динамикой природных вихревых структур, а также из-за большого числа воздействующих на маркер параметров, особый интерес представляет изучение переноса маркеров в стационарных вихревых течениях, которые могут формироваться в лабораторных установках с неизменными внешними условиями. В этом случае можно избежать проблем, связанных с пространственной и временной изменчивостью природных источников вихревых образований и непосредственно прослеживать зависимости характерных параметров течения или характеристик перемещения твердотельных или иных объектов, помещенных в течение. Отдельный интерес представляет сравнение характеристик этих перемещений в условиях одного эксперимента для различных маркеров.

Цель данной работы – выявить влияние управляемых внешних параметров на закономерности перемещения твердотельного маркера по поверхности вращающейся жидкости.

Экспериментальная установка и параметры течения

Эксперименты проводились на стенде для моделирования вихревых течений с кручением (ВТК), входящим в УНУ «ГФК ИПМех РАН». Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1, *а*, фотография – на рис.1, *б*. Вихревое течение создавалось вращаю-

щимся диском, установленным на дне прозрачного цилиндрического контейнера. Подробное описание установки и физические характеристики рабочих сред приведены в [3].

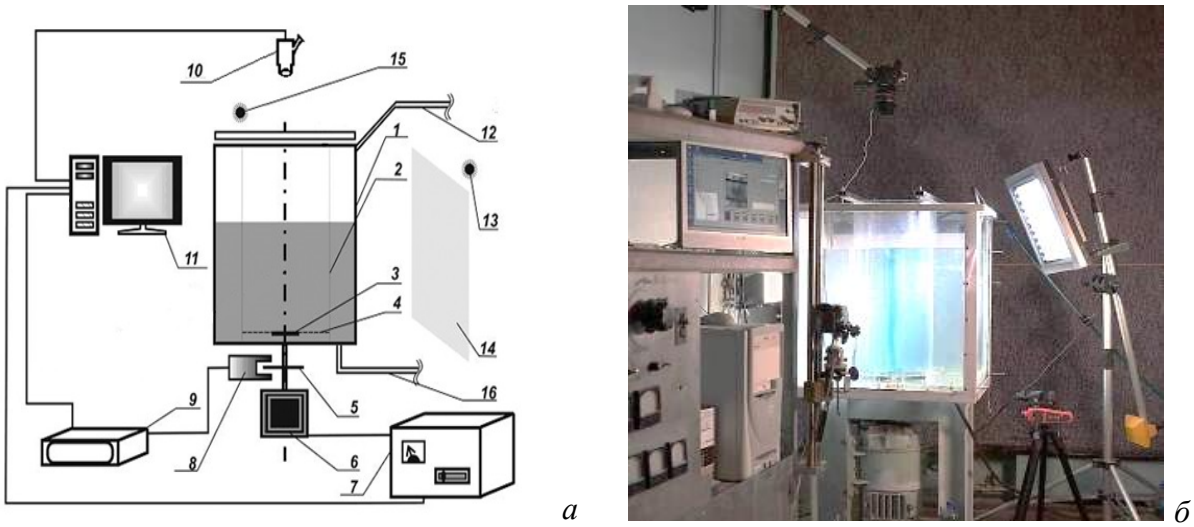


Рис. 1. *Общий вид стенда для моделирования вихревых течений с кручением (ВТК) УНУ «ГФК ИПМех РАН»: а) – схема, б) – фотография установки*

Перед началом эксперимента, бассейн заполнялся водой. Уровень жидкости задавался отдельно для каждой серии экспериментов. После включения электромотора, вращающего диск и окончания всех переходных процессов в жидкости, в установившееся течение помещались маркеры. Одновременно с этим начиналась регистрация перемещения маркеров по поверхности жидкости с помощью цифровой видеокамеры, расположенной вертикально над бассейном. Все экспериментальные данные записывались непосредственно на диск ПК.

В простом по геометрии эксперименте возникало достаточно сложное течение, включающее как вихревую, так и волновые компоненты и в толще, и на свободной поверхности жидкости (рис. 2).

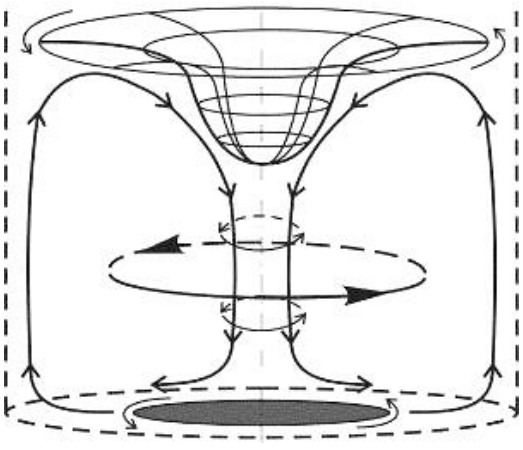


Рис. 2. *Схема течения, возникающего в цилиндрическом контейнере под действием диска.*

Равномерно вращающийся диск, вследствие условия прилипания, закручивает жидкость вокруг вертикальной оси и одновременно отбрасывает ее вдоль своей поверхности к стенке контейнера. Ускоренная жидкость поднимается вдоль стенок контейнера, смещается к центру вдоль свободной поверхности и погружается в окрестности оси вращения, формируя подтекающее к центру диска течение, компенсирующее постоянный перенос вещества вдоль его поверхности. Непосредственно над поверхностью диска частицы вращаются и одновременно смещаются от центра к кромке. Наблюдаемую картину течения можно схематично свести к комбинации двух вихрей, один из которых вертикальный цилиндрический (вокруг вертикальной оси, угловая скорость ω_c), а другой – тороидальный, с круговой осью, охватывающей центральную вертикальную ось с локальной угловой скоростью ω_t Композиционное течение, образованное наложением двух вихрей, характеризуется суммарной частотой $\omega = \omega_c + \omega_t$.

Варьирование глубины слоя жидкости, размеров и частоты вращения диска позволяет изучать воспроизводимую картину вихревого течения в широком диапазоне параметров (Табл. 1).

Таблица 1

Основные параметры течения

Параметр	Минимальное значение	Максимальное значение
Число Рейнольдса $\mathrm{Re} = (R_d^2\Omega)/\nu$	50	1×10^5
Число Фруда $\mathrm{Fr} = (R_d^2\Omega^2)/gH$	1×10^{-2}	15
Число Вебера $We = \rho L^3\Omega^2/\sigma$	0.02	300
Число Бонда $\mathrm{Bo} = gH^2(\rho_1-\rho_2)/\sigma$	0.15	2.0
Число Атвуда $A = (\rho_1-\rho_2)/(\rho_1+\rho_2)$	15×10^3	40×10^3
$\xi_H = R_d/H$	0.08	3.0
$\xi_0 = R_d/R_c$	0.3	1.0
$\xi_b = 2R_k/h_k$	0.01	3.0
$L_\Omega = g/\Omega^2$	25	4×10^3
$\delta_\Omega = \sqrt{\nu/\Omega}$	2×10^{-4}	6×10^{-4}

Многообразие характерных размерных и безразмерных параметров задачи свидетельствует о сложности и нестационарности изучаемого течения, что учитывалось при разработке методики эксперимента и конструкции экспериментальной установки.

Движение твердотельных маркеров в составном вихре. Эксперимент (состоящий из трех опытов с одинаковыми условиями для каждого маркера) был проведен для маркера-пробирки, высотой 2,5 см и диаметром 9 мм, а также для квадратной пластинки с длиной стороны 2 см и толщиной 1 мм (рис. 3).

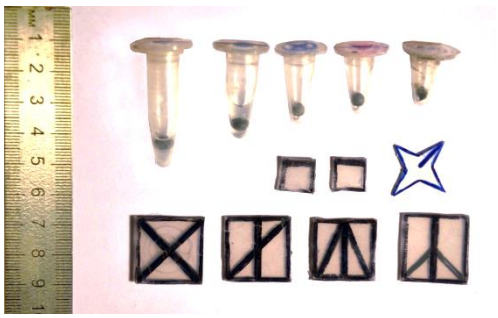


Рис. 3. *Маркеры, используемые в эксперименте*

Отснятая видеозапись разбивалась на стоп-кадры, в процессе обработки которых определялось положение центра маркера, его ориентация в пространстве (по положению специальной метки на крышке маркера) и его траектория. Схема перемещения маркера представлена на рис. 4. Направление вращения диска (черная стрелка) и жидкости (белая стрелка) осуществлялось против часовой стрелки. Направление собственного вращения маркера отмечено черно-белой стрелкой.

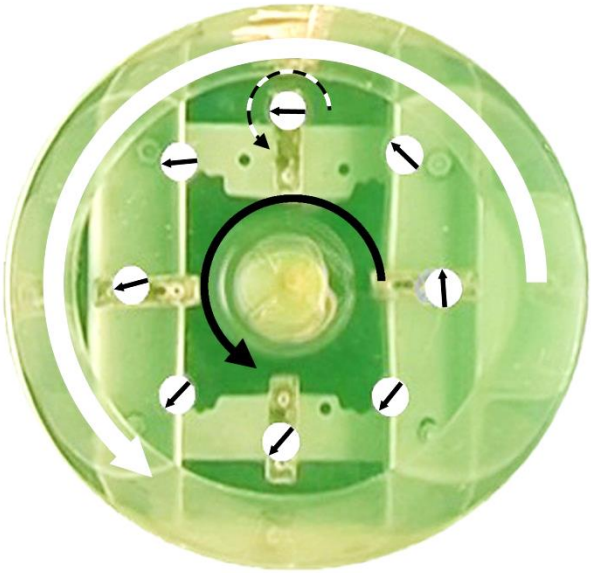
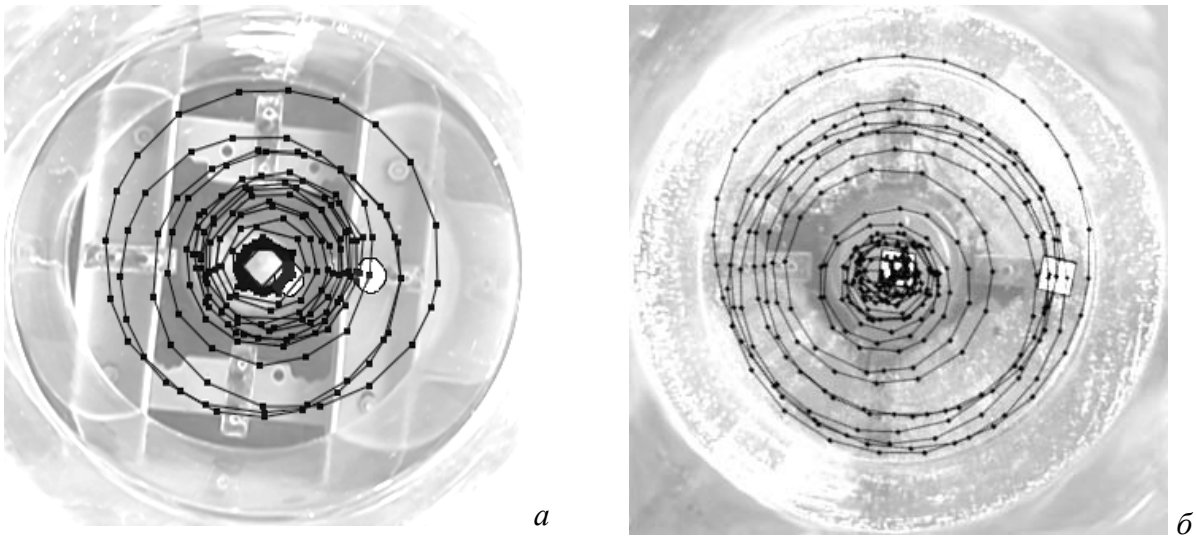


Рис. 4. *Схема перемещения маркера по поверхности вихря*

На основе полученных данных рассчитывалось расстояние от центра маркера до центра каверны R, обозначающего центр вращения поверхностного слоя жидкости, угловая скорость вращения маркера вокруг центра каверны Ω, собственная частота вращения маркера вокруг своей оси ω.



а *б*

Рис. 5. *Траектории движения маркеров: а) – пробирка, б) – плоский квадрат*

На рис. 5 приведены примеры траекторий для обоих типов маркеров с отмеченным начальным и конечным положением маркера. В обоих случаях маркер в начале движения сначала удалялся от центра бассейна, а затем начинал постепенно приближаться к его центру. Кроме того, все маркеры вращались вокруг собственной оси [4].

На рис. 6 показаны полученные зависимости собственной частоты вращения маркера ω от угловой скорости вращения маркера Ω, могущей служить характеристикой движения жидкой среды. Данные эксперимента показывают, что существует зависимость между этими величинами. Цветами отмечены значения, полученные при обработке различных видеозаписей. Отметим, что положение на графиках точек разного цвета говорит об устойчивом воспроизведении эксперимента. Вращающаяся среда, увлекая за собой помещенное на поверх-

ность вихря тело, не только приводит его во вращение вокруг центра вихря, но и вызывает вращение маркера вокруг своей оси.

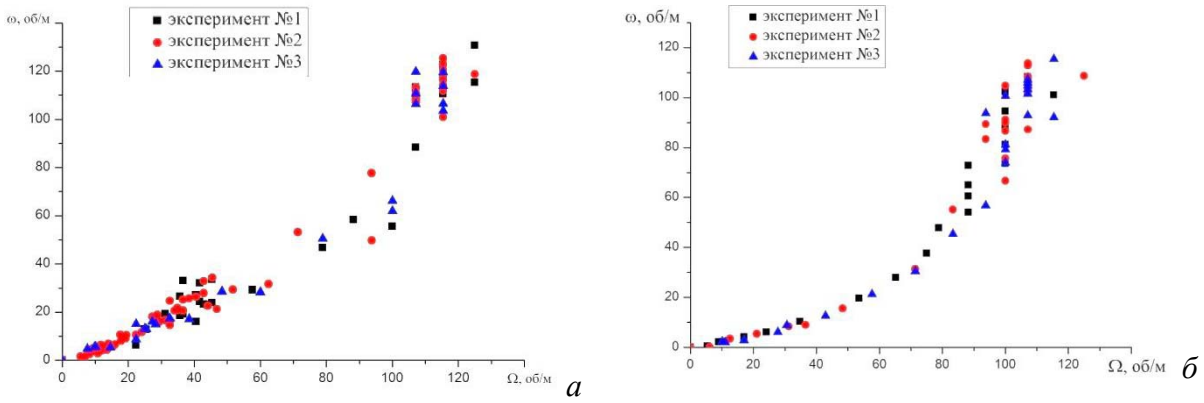


Рис. 6. *Зависимость собственной частоты вращения маркера ω от частоты вращения вокруг центра вихря Ω: а) – пробирка, б) – плоский квадрат*

При этом, частота вращения маркера вокруг собственного центра в данном течении растет с увеличением частоты его обращения относительно центра вихря. Однако, данная связь может трактоваться как линейная только на небольшом промежутке частот. На всем протяжении, кривая может быть аппроксимирована степенной зависимостью вида $\omega_p = \omega_{1p} \exp(\frac{\Omega_p}{\Omega_{1p}}) - \omega_{2p}$; с коэффициентами $\omega_{1p} = 28 \pm 7$; $\Omega_{1p} = 72 \pm 8$; $\omega_{2p} = 27 \pm 8$ для микропробирки и $\omega_s = \omega_{1s} \exp(\frac{\Omega_s}{\Omega_{1s}}) - \omega_{2s}$, $\omega_{1s} = 16 \pm 1$; $\Omega_{1s} = 55 \pm 2$, $\omega_{2s} = 16 \pm 1$ для плоского маркера (рис. 7). Важно подчеркнуть, что твердотельный маркер движется в согласии с интуитивным представлением о характере его переноса – он несколько сползает вниз по поверхности каверны и закручивается напряжениями сдвига скорости течения жидкости [5]. Вид аппроксимирующей функции $\omega = \omega_1 \exp(\frac{\Omega}{\Omega_1}) - \omega_2$ и значения коэффициентов $\omega_1, \omega_2, \Omega_1$ зависят от параметров движения и формы тела.

Во всех случаях наблюдалось воспроизводимое распределение маркеров по расстоянию их до центра вращения вихря. Центральное положение быстрее всего занимал маркер-квадрат, с течением времени он продолжал оставаться в центральной области воронки. Маркер-звезда устойчиво занимал положение в 3 – 6 см от центра. Маркер-пробирка на протяжении опытов оставалась на периферии вихря, совершая периодические приближения к центру, но не достигая расстояния менее 6 см.

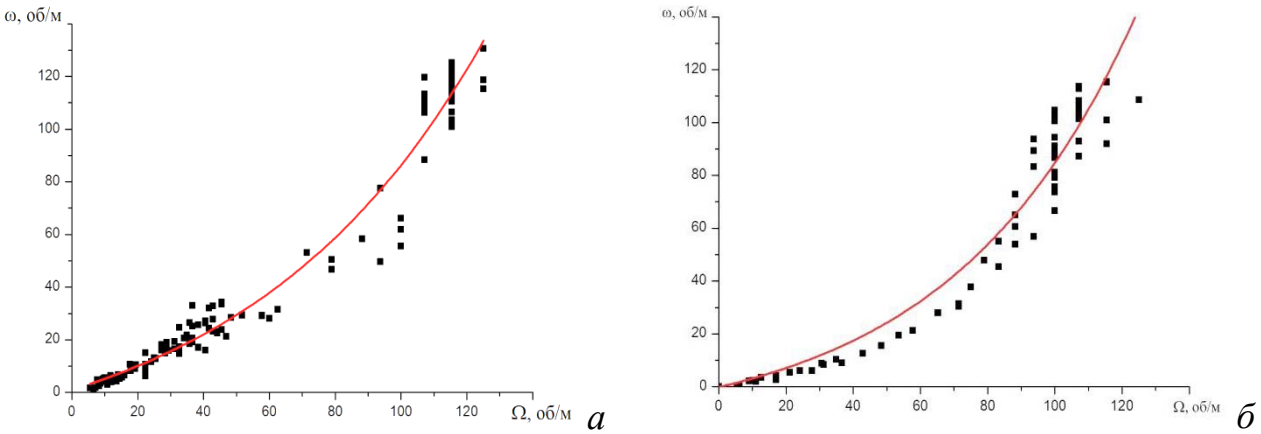


Рис. 7. *Экспоненциальная аппроксимация зависимости собственной частоты вращения маркера ω от частоты вращения вокруг центра вихря Ω: а) – пробирка, б) – квадрат.*

В следующем эксперименте в установку помещалось одновременно три полипропиленовых маркера различной формы: квадрат, звезда и пробирка из набора (рис. 3).

На основе полученных данных были рассчитаны зависимости собственных частот вращения маркеров ω от частоты вращения маркера вокруг центра вихря Ω и от расстояния от центра маркера до центра вихря *R* по всей серии проведенных опытов (рис. 8, 9).

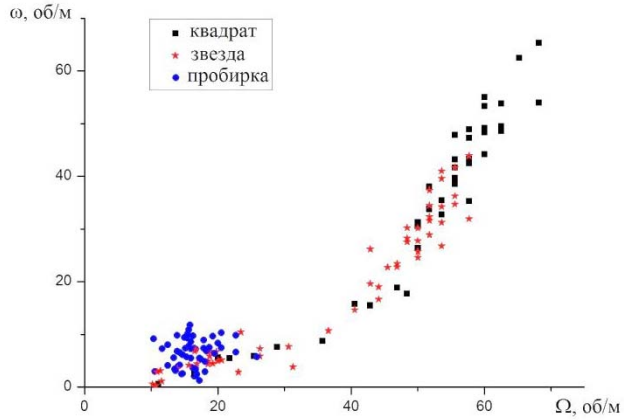


Рис. 8. *Зависимость угловой частоты вращения маркера вокруг своей оси ω от угловой скорости вращения вокруг центра Ω.*

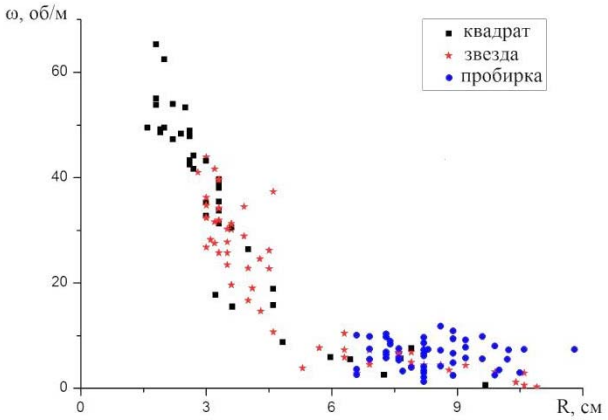


Рис. 9. *Зависимость угловой частоты вращения маркера вокруг своей оси ω от расстояния от центра маркера до центра вихря R.*

Данные зависимости также могут быть аппроксимированы степенной зависимостью вида $\omega = \omega_1 \exp(\frac{\Omega}{\Omega_1})$; с коэффициентами $\omega_1 = 3{,}2 \pm 0{,}6$; $\Omega_1 = 22 \pm 1$; для зависимости $\omega(\Omega)$ (рис. 10) и $\omega = \omega_1 \exp(-\frac{R}{R_1})$, $\omega_1 = 122 \pm 8$; $R_1 = 2{,}3 \pm 0{,}2$ для зависимости $\omega(R)$ (рис. 11).

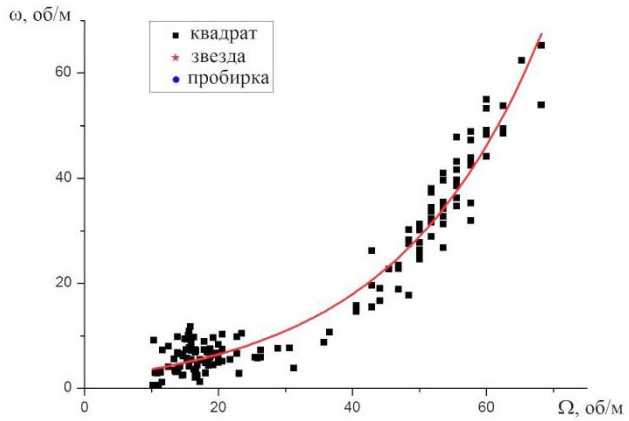


Рис. 10. *Зависимость угловой частоты вращения маркера вокруг своей оси ω от угловой скорости вращения вокруг центра Ω*

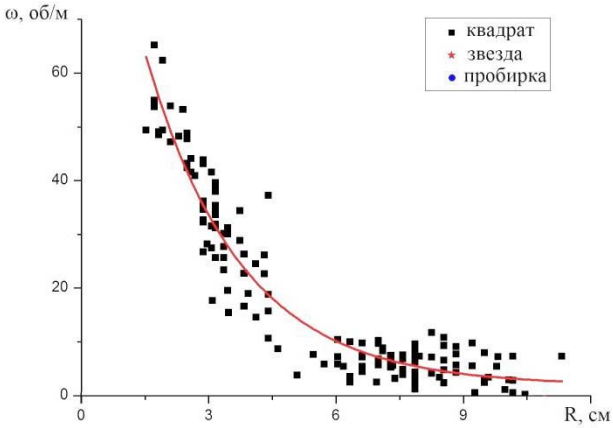


Рис. 11. *Зависимость угловой частоты вращения маркера вокруг своей оси ω от расстояния от центра маркера до центра вихря R*

Опыты подтверждают неоднозначность поведения в вихре твердотельных маркеров различной формы. Сильная изменчивость скорости обусловлена нестационарным движением маркеров в сложном волно-вихревом течении.

Заключение

Проведенные эксперименты показывают ярко выраженную зависимость параметров, характеризующих движение маркера на поверхности вихря от формы и размеров маркера. У обоих типов маркеров после попадания в вихрь первоначально наблюдается движение на периферию, а затем уже к центру вихря.

Твердотельные маркеры обращаются вокруг центра каверны вихря и одновременно вращаются вокруг собственной оси. Угловые скорости вращения и обращения связаны функциональной зависимостью, вид которой также определяется параметрами течения и свойствами маркера (объем, масса, размеры и форма).

Одним из традиционных способов описания течения жидкости является наблюдение за траекториями перемещения в потоке плавучих поплавков-маркеров. Проведенные опыты показывают, что при таком подходе важен учет зависимости указанных траекторий от физико-химических свойств маркеров, а расчет траектории движения жидкости необходимо производить с поправками, учитывающими влияние самого маркера на движущуюся среду.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ №14-01-00015 а.

Литература

1. http://www.argos-system.org/?nocache=0.39532845656356175
2. http://www.space.com/4826-spiral-galaxy-winds.html
3. *Степанова Е.В., Чаплина Т.О., Чашечкин Ю.Д.* Перенос масла в составном вихре // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2011. № 2. С. 52–64.
4. *Будников А.А., Жарков П.В., Чашечкин Ю.Д.* Экспериментальное моделирование процесса переноса плавающих объектов в «мусорных островах» // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика, астрономия. 2012. № 4. С. 83–88.
5. *Будников А.А., Чашечкин Ю.Д.* Моделирование формирования «мусорных островов» в вихревом океане // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2012. № 23. С. 83–90.