

Особенности переноса примеси в стационарном вихревом течении

Т. О. Чаплина¹, Е. В. Степанова², Ю. Д. Чашечкин²

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 РАН. Россия, 119526, Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1.
E-mail: ^atanya75.06@mail.ru

Статья поступила 17.12.2011, подписана в печать 10.03.2012.

Изучена картина переноса вещества в составном вихревом течении, контактирующим со свободной поверхностью. Прослежена эволюция компактного пятна маркера (анилиновые чернила или подсолнечное масло) в спиральные рукава на поверхности вихря, который создавался равномерно вращающимся диском в цилиндрическом контейнере. Определены параметры структурных элементов течений. Геометрия спирального течения структурно устойчива в широком диапазоне параметров опытов.

Ключевые слова: составной вихрь, примесь, спиральные рукава.

УДК: 551.46. PACS: 92.05.Bc.

Введение

По мере роста экономики и развития производств в природную среду попадает все большее количество химически активных веществ и соединений, в том числе экологически опасных, которые попадают и в воздушный бассейн, и в гидросферу. Периодически происходят катастрофы на производствах с участием ядовитых веществ, в частности диоксина (катастрофы в Бхопале, Индия, 1984, Севесо, Италия, 1976, сбросы в Амур, Китай, 2005, авария на заводе по переработке ядерного топлива, Селлафилд, Великобритания, 2005). Для контроля уровня загрязненности и обеспечения экологической безопасности или даже для планирования эвакуации людей необходимо оценивать перенос вещества из компактного источника в сложившихся гидрометеорологических условиях. На перенос вещества влияют течения в гидросфере — аналог ветра в атмосфере, вихри и волны (стоксов дрейф). Наиболее полно теоретически и экспериментально изучено влияние течений, как ламинарных, так и турбулентных, на перенос вещества [1]. Теоретически исследован перенос вещества в нелинейных волнах [2].

Развитие технических средств получения инфор-

мации об удаленных и крупномасштабных объектах позволило получить и построить большое количество впечатляющих изображений вихревых течений в атмосфере и океане с выраженным спиральными рукавами, разделенными полосами базового вещества, а также изображений различных космических объектов, несущих схожие черты (рис. 1). Выраженные спиральные структуры регистрируются как в установившихся, так и в нестационарных течениях.

Теоретические исследования вихревых течений основываются на теории идеальной жидкости в покоящейся [5, 6] и вращающейся среде [7] с использованием априорных предположений о динамике явления. Большой цикл работ посвящен изучению распространения в вихревых течениях примеси, которая предполагается пассивной [8, 9]. В ранее выполненных экспериментах показано, что примесь в глобально вращающихся жидкостях сосредоточивается в компактных областях, имеющих характерную форму спиральных структур — «стен краски» [10, 11], представленных в ряде публикаций [12, 13].

При моделировании переноса и растворимых (смешивающихся), и нерастворимых примесей (различных

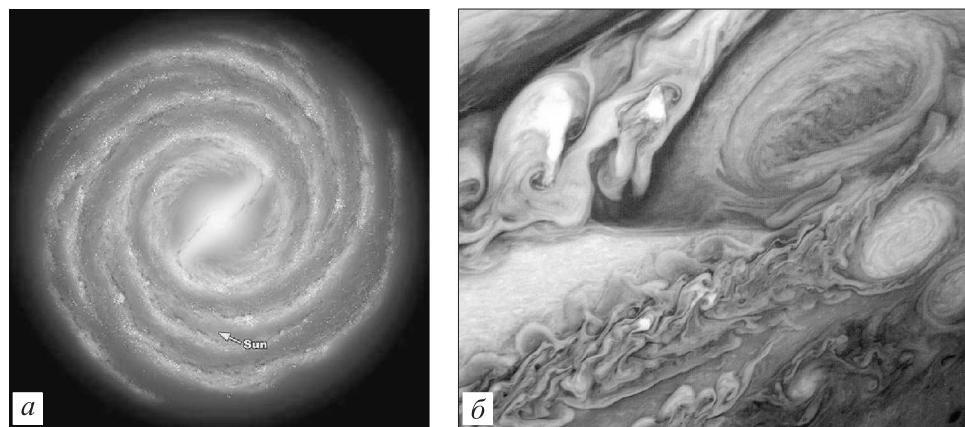


Рис. 1. Изображения спиральных структур: спиральная галактика NGC 1566 [3] (а) и красное пятно на Юпитере [4] (б)

видов масел [14]) компактное пятно на поверхности вихря трансформируется в спиральные рукава, разделенные полосами чистой воды. Такая пространственная структура качественно соответствует наблюдаемой в природных условиях, тогда как в лаборатории обеспечивается высокая степень воспроизводимости начальных условий в установившемся вихревом течении, что позволяет многократно повторять эксперименты с необходимыми параметрами.

Целью исследования является регистрация переноса растворимых и нерастворимых маркеров из компактного пятна в стационарном составном вихре.

Экспериментальная установка

Постоянное вихревое течение создается вращающимся диском, установленным на дне цилиндрического контейнера, который для уменьшения оптических искажений помещался в открытый прямоугольный бассейн 1 из прозрачного полиметилметакрилата, выполненный в виде параллелепипеда размерами $63.6 \times 44.6 \times 70.0$ см без верхней грани (рис. 2). Все грани параллелепипеда выполнены из листового органического стекла толщиной 20 мм. Бассейн заключен в раму из металлического швеллера 2 и закреплен внутри нее при помощи винтов. Внутрь прямоугольного бассейна вставлен цилиндрический контейнер 3, закрепленный неподвижно относительно бассейна прижимной арматурой 4. Для сохранения постоянного объема жидкости внутри контейнера нижний его торец устанавливается на резиновое кольцо-прокладку 5. Вертикальная ось цилиндрического контейнера совпадает с осью вращения вала электромотора 6, на валу которого жестко закреплен индуктор течения (диск) 7, составляющий вместе с фальшдном 8 плоскость, ограничивающую снизу исследуемый объем жидкости. Электромотор вращает индуктор равномерно с угловыми скоростями от 200 до 2000 об/мин. Измерение частоты вращения

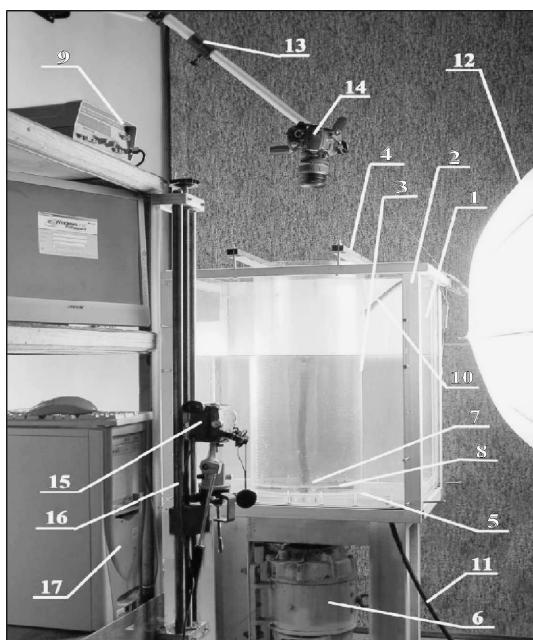


Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки «Вихревые течения с кручением» (ВТК)

диска проводится с помощью оптического датчика, соединенного с цифровым частотомером 9. Бассейн заполняется отстоянной водопроводной водой комнатной температуры до заранее выбранного уровня через шланг 10. По окончании эксперимента бассейн опустошается через отверстие в нижней грани, к которому присоединен шланг 11, ведущий к насосу. Освещение рабочего объема жидкости производится специализированным прожектором, снабженным регулятором мощности и рассеивателем в форме полупрозрачного зонта 12.

Оптическая регистрация картины течения ведется с двух различных точек. Состояние свободной поверхности регистрирует закрепленная на настенном штативе 13 фото- или видеокамера 14, которая располагается строго над цилиндрическим контейнером. Процессы в толще жидкости регистрируются при помощи фото- или видеокамеры 15, закрепленной на вертикальном штативе 16, позволяющем перемещать камеру вертикально вдоль всей боковой стенки бассейна. Изображение с камер записывается на жесткий диск ПК 17. В экспериментальной установке возможно проводить исследования в диапазоне глубин слоя жидкости от 5 до 60 см, радиусов диска от 2.5 до 14 см. Свободная поверхность позволяет использовать широкий набор маркеров и контролировать условия их введения.

В качестве нерастворимой примеси использовались касторовое и рафинированное подсолнечное масла, растворимыми маркерами служили анилиновые чернила различных цветов и раствор уранила.

Параметризация течения

В простом по геометрии эксперименте возникало достаточно сложное течение, включающее как вихревую, так и волновые компоненты и в толще, и на свободной поверхности жидкости. Равномерно вращающийся диск вследствие условия прилипания закручивает жидкость вокруг вертикальной оси и одновременно отбрасывает ее вдоль своей поверхности к стенке контейнера (рис. 3). 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.

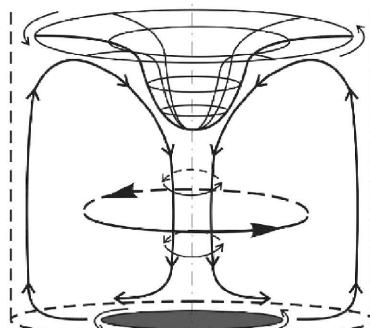


Рис. 3. Постулируемая схема течения, возникающего в цилиндрическом контейнере под действием диска

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 (рис. 3). В результате их совместного действия формируется сложное течение, в котором частицы жидкости движутся по спиральным и винтовым траекториям. Композиционное течение, образованное наложением двух вихрей, характеризуется суммарной частотой $\omega = \omega_c + \omega_t$. В сложном вихревом течении существуют различные элементы, масштабы которых формируют комплексы безразмерных величин, характеризующих течение в целом.

В течении с мгновенной угловой скоростью вращения жидкости ω , которое возбуждается диском, вращающимся с угловой скоростью Ω , определяющими служат инерциальные масштабы, задаваемые отношениями ускорения свободного падения к угловой скорости вращения диска $\Delta_\Omega = g/\Omega^2$ и частиц жидкости $\Delta_\omega = g/\omega^2$, и микромасштабы, характеризующие сингулярно возмущенные компоненты (пограничные слои Стокса) на диске $\delta_\Omega = \sqrt{\nu/\Omega}$ и других контактных поверхностях $\delta_\omega = \sqrt{\nu/\omega}$, в том числе и на свободной поверхности.

Важнейшие безразмерные параметры течений — числа Рейнольдса $Re = (R^2\omega)/\nu$ (также используется число Экмана $Ek = 1/Re$) и Фруда $Fr = (R^2\omega^2)/gH$ — характеризуют динамические условия опыта. Течение

двухслойной среды дополнительно характеризуют числа Атвуда $At = (\rho_1 - \rho_2)/(2(\rho_1 + \rho_2))$ и Бонда $Bo = gH^2 \times (\rho_1 - \rho_2)/\sigma$, где ρ_1 и ρ_2 — плотности составляющих жидкостей. Дополнительные безразмерные параметры задачи определяются отношениями характерных линейных размеров: $\xi_H = R_0/H$ — относительная глубина контейнера, $\xi_R = R_0/R$ — относительный радиус индуктора. При значениях $\xi_H \gg 1$ контейнер считается мелким, а при $\xi_H \ll 1$ — глубоким.

Изучаемые в данных опытах течения характеризуются безразмерными параметрами $Re = 500 \div 50000$, $Fr = -0.5 \div 20$, $At = -0.009 \div 0.2$, $Bo = 1 \div 4.5$, лежащими в диапазоне изменчивости мелкомасштабных физических процессов в океане, что указывает по крайней мере на качественное подобие картины переноса вещества в лабораторных и природных условиях [15].

Перенос растворимой примеси из пятна на поверхности составного вихря

В серии опытов, проведенных с растворимым маркером, прослежена деформация пятна на поверхности составного вихря в спиральные рукава [14]. Процесс закручивания спирали из капли синих анилиновых чернил, внесенной на свободную поверхность, представлен на рис. 4. Удлинение спирального рукава происходит в двух направлениях — к центру вращающейся свободной поверхности и к ее периферии. В момент времени $t = 1$ с (рис. 4, a) угловой размер окрашенной спирали составляет 202° , толщина рукавов меняется

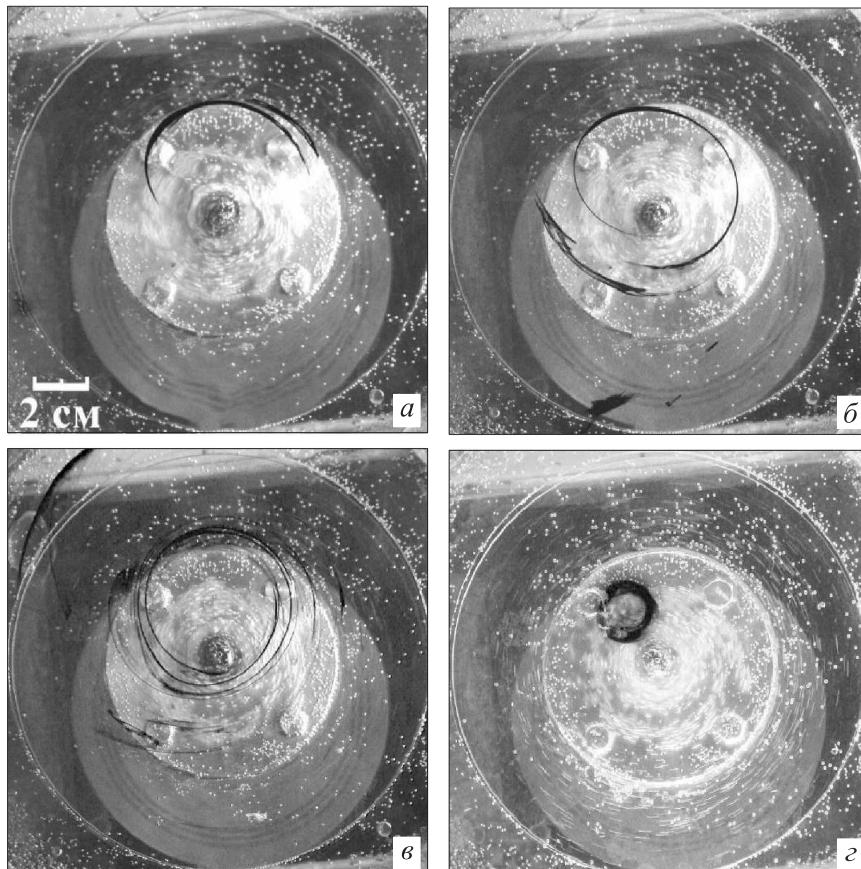


Рис. 4. Эволюция пятна красителя на поверхности вращающейся жидкости ($\Omega = 100$ об/мин, $R = 7.5$ см, $H = 10$ см): $t = 1$ с (a), 3 с (b), 11 с (c) и 60 с (d)

в пределах от 0.5 до 3 мм. В центральной части спирали заметно утолщение, соответствующее первоначальному положению пятна красителя на свободной поверхности жидкости.

Спустя 2 с (рис. 4, б) вытянувшись из капли примеси спиральные рукава полностью охватывают ось вращения поверхности воды, угловой размер спирали составляет 367° . Радиальное положение точек спирали относительно центра вращения свободной поверхности в момент времени $t = 3$ с меняется в пределах от 2.2 до 5 см. Толщина спиральных рукавов от 0.5 до 2.3 мм, максимальное значение толщины спиральных рукавов соответствует положению первоначального пятна на свободной поверхности. Спиральная структура, вытягивающаяся из красителя, попавшего вне основного пятна примеси, начинает размываться, на ней появляются петли возвратного течения.

В момент времени $t = 11$ с (рис. 4, в) угловой размер спиральной структуры превышает 800° , толщина спиральных рукавов вдоль всей структуры незначительно отклоняется от среднего значения, равного 0.7 мм. На свободной поверхности жидкости становятся хорошо заметны петли в спиральной структуре, соответствующие областям возвратного течения (рис. 4, в, направления «на 3 часа», «на 7 часов», «на 9 часов»). Со временем спиральная структура трансформируется в систему тонких вложенных колец (рис. 4, г), максимальное радиальное положение точек этой системы относительно центра вращения составляет 0.9 см. Эта величина значительно меньше первоначального расстояния от центра вращения жидкости до пятна красителя. В начале развития спиральной структуры форма границы занятой спиралью области близка к эллиптической (рис. 4, а, б). При этом эллипс также вращается в лабораторной системе координат. С течением времени форма границы занимаемой спиральными рукавами эллиптической области, сглаживается, ее эксцентриситет убывает. Процесс распространения красителя к периферии вращающейся жидкости замедляется.

Независимый перенос красителя в толщу составного вихря проиллюстрирован на рис. 5. На приведенных фотографиях — опыт, проводившийся с подкрашиванием воды при помощи водорастворимого флюoresцирующего красителя (уранил), который в ультрафиолетовом освещении излучает зеленый свет.

Глубина проникновения окрашенного центрального столба увеличивается со временем (рис. 5, а–в). Часть маркирующей примеси погружается в окрестности оси течения, формируя окрашенный центральный столб диаметром 3.6 см (рис. 5, а), который со временем убывает и составляет здесь 2.76 см (рис. 5, в). Часть маркирующей примеси, расположавшейся на поверхности в спиральных рукавах, погружается вдоль внешней цилиндрической оболочки. Скорость распространения красителя вдоль внешней цилиндрической поверхности выше скорости оседания краски в центральном столбе. Краска, двигающаяся от поверхности вращающейся жидкости к дну сосуда, где расположен вращающийся диск, распространяется в областях с хорошо различимыми границами. Как только краситель проникает на всю глубину жидкости и контактирует с вращающимся диском, интенсивное перемешивание окрашенной жидкости на поверхности диска с основной массой неокрашенной жидкости в вихре приводит к ухудшению видимости картины течения в экспериментальной установке (рис. 5, в). На фотографии представлены обе области интенсивного переноса маркирующей примеси в толще жидкости: и центральный окрашенный столб, и охватывающая его тонкая цилиндрическая оболочка. На протяжении всего эксперимента на поверхности жидкости можно видеть окрашенную спиральную структуру, оценка толщины приповерхностного окрашенного слоя дает значение 0.3 см. Осредненный по серии изображений диаметр цилиндрической оболочки составляет 7.1 см, толщина стенок 0.4 см.

Проведенные эксперименты с подкрашивающими веществами различных цветов (синие и фиолетовые аниловые чернила), которые также вводились в поток через свободную поверхность, показали устойчивость картины течения в вихре с добавлением примеси.

Нерастворимая примесь на поверхности составного вихря

Общая структура течения сохраняется при использовании в качестве маркера жидкости, которая не смешивается с водой (в данных опытах — рафинированное подсолнечное масло) и формирует дополнительную поверхность раздела. В проведенных опытах пятно маркирующей жидкости (подсолнечное или касторовое масло) заданного объема V_k помещалось на поверх-

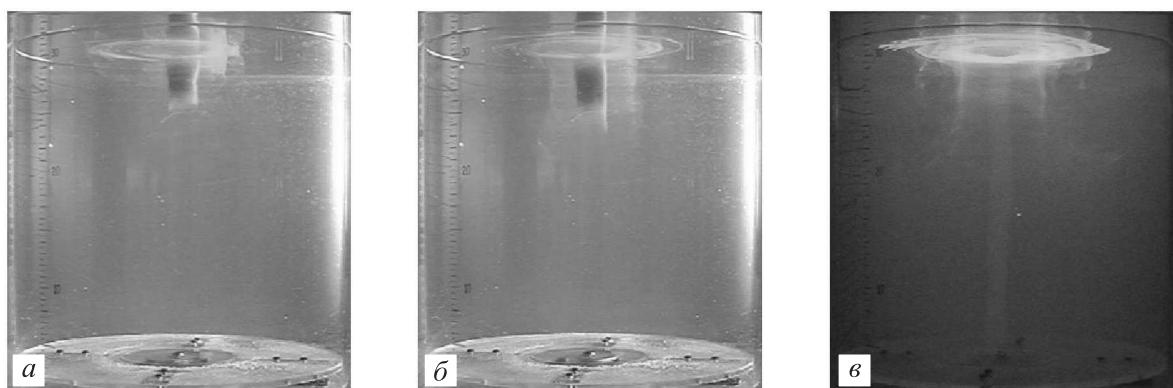


Рис. 5. Перенос красителя в толще вращающейся жидкости: $t = 18$ с (а), 39 с (б) и 304 с (в) ($H = 30$ см, $\Omega = 200$ об/мин, $R = 5.0$ см)

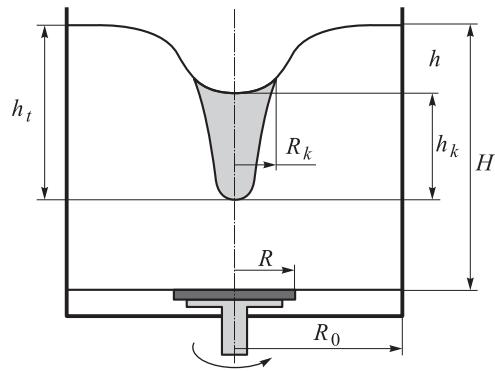
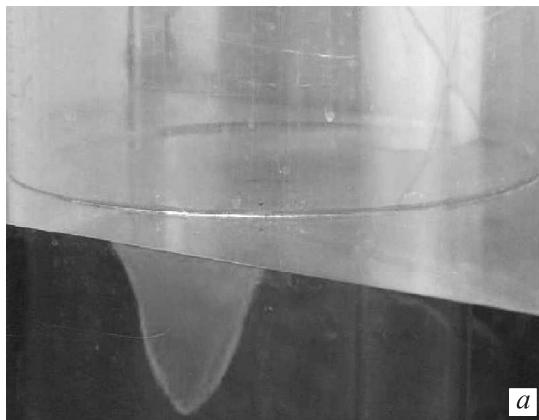
ность покоящейся воды. Физические характеристики рабочих сред представлены в [14].

В толще жидкости большая часть примеси собирается в масляное тело в окрестности оси вращения (рис. 6). Как и в случае растворимой примеси, масло на поверхности жидкости формирует спиральные рукава, разделенные полосами чистой воды. Геометрические параметры структуры — размеры и форма рукавов, положения контактных поверхностей — зависят от радиуса и угловой скорости вращения диска, глубины слоя воды H и количества примеси V_k .

В ходе исследования распределения несмешивающейся примеси по поверхности и в толще составного вихря были получены данные о положении примеси как в толще, так и на свободной поверхности рассматриваемого вихревого течения. Представленные на рис. 7 фотографии профиля составного вихря с добавлением нерастворимой примеси иллюстрируют изменение по-

ложений границ воздух–жидкость и масло–вода в зависимости от количества примеси на поверхности V_k и глубины слоя воды H .

При умеренных частотах вращения диска ($\Omega \approx 300$ об/мин) на поверхности воды с добавлением различного количества масла образуется каверна, глубина которой h_t зависит как от объема масла, так и от глубины слоя воды H . Для таких небольших частот вращения уже существенно влияние количества примеси. При частоте вращения активатора 320 об/мин и добавлении 30 мл подкрашенного подсолнечного масла прогиб поверхности воздух–жидкость имеет наибольшее значение, периферическая часть свободной поверхности покрыта небольшими каплями масла, вытянутыми в направлении вращения поверхности жидкости (рис. 7, а). С увеличением добавленного объема масла сокращается прогиб свободной поверхности и возрастает площадь отдельных капель масла, движу-



б

Рис. 6. Составной вихрь с порцией подсолнечного масла ($k = 700$ мл, $H = 40$ см, $R = 7.5$ см, $\Omega = 380$ об/мин): фотография (вид сбоку через поверхность раздела жидкость–воздух) (а) и схема течения (б)

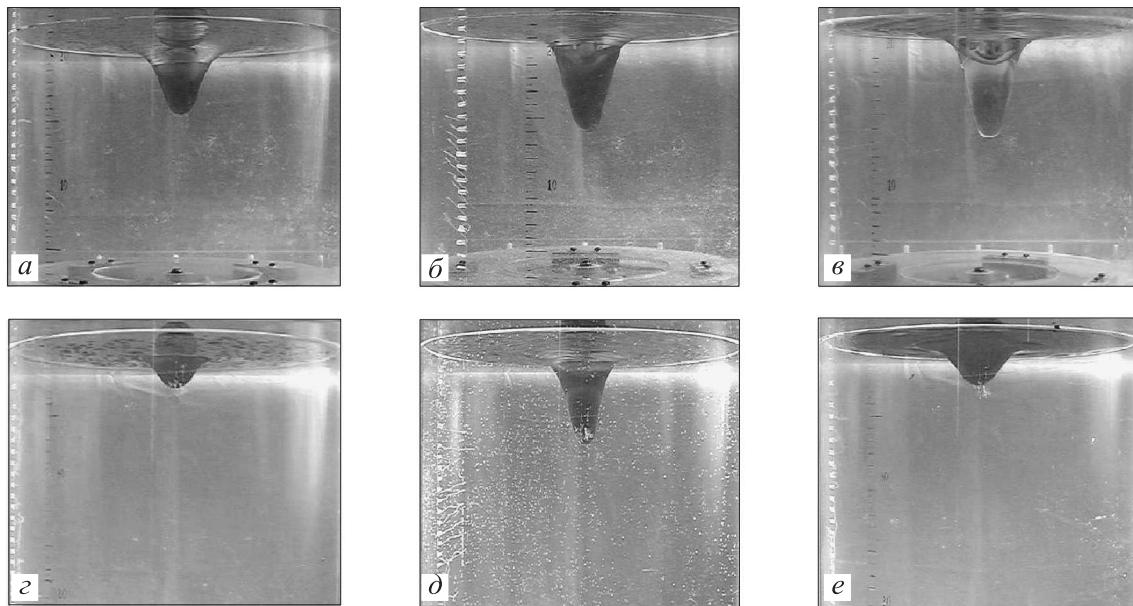


Рис. 7. Формы осевого сечения поверхности жидкости на близких частотах ($R = 7.5$ см): $H = 20$ см, $\Omega = 320$ об/мин, $V_k = 30$ мл (а), $\Omega = 310$ об/мин, $V_k = 90$ мл (б), $\Omega = 320$ об/мин, $V_k = 150$ мл (в); $H = 40$ см, $\Omega = 300$ об/мин, $V_k = 30$ мл (д), $\Omega = 320$ об/мин, $V_k = 90$ мл (б), $\Omega = 260$ об/мин, $V_k = 150$ мл (в)

шихся по периферии (рис. 7, б). Дальнейшее увеличение объема масла приводит к уменьшению прогиба поверхности воздух–жидкость, помимо этого возрастает объем масла, не стянутого в центральное масляное тело (рис. 7, в).

Большая глубина жидкости также существенно влияет на распределение легкой примеси в составном вихре. Небольшая порция масла (рис. 7, г) почти целиком собирается в окрестности оси вращения, масляное тело имеет высоту 2.3 см, а поверхность разделя воздух–жидкость остается почти плоской. Периферия поверхности занята масляными каплями. Большое количество масла $V_k = 150$ мл создает масляное тело, по форме напоминающее шляпу, края которой образованы спиральными рукавами, вытягивающимися в направлении, противоположном вращению активатора (рис. 7, е). Добавление такого количества масла практически полностью элиминирует депрессию контактной поверхности жидкость–воздух. Поверхность раздела воздух–жидкость практически вся состоит из масла и очень близка к плоской. Промежуточное количество масла $V_k = 90$ мл приводит к прогибу свободной поверхности и затягиванию масла в глубь составного вихря (рис. 7, д).

На поверхности вращающейся жидкости с добавлением небольшого количества масла (30 мл) центральное ядро — верхняя поверхность масляного тела и прилегающая сплошная масляная пленка — окружено системой капель, вытянутых в тангенциальном направлении (рис. 8, а). Контур пленки вытянут в направлении на «10–4» часа, его максимальный размер составляет 5.15 см, минимальный 4.88 см. Диаметр контейнера 29.6 см, тогда как на рис. 8 представлена центральная часть диаметром 17 см.

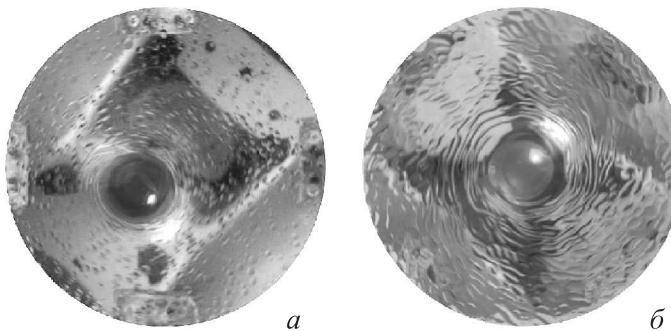


Рис. 8. Эволюция формы пятна подсолнечного масла в составном вихре ($H = 20$ см, $R = 7.5$ см): $\Omega = 320$ об/мин, $V_k = 30$ мл (а), $\Omega = 310$ об/мин, $V_k = 90$ мл (б)

С увеличением угловой скорости вращения диска большая часть масла на свободной поверхности оказывается сосредоточенной в центральной части, внешняя кромка масляной пленки имеет грушевидную форму, ориентированную заострением вниз.

С увеличением количества масла внешний контур центрального пятна теряет регулярную форму, на нем образуются отдельные выступы, заострения, неровности, порождающие протяженные спиральные рукава, некоторые из них отрываются от центральной пленки и существуют в виде отдельных нитевидных

структур спиральной формы (рис. 8, б). Рукава могут расщепляться и разрываться, неравномерно заполняя периферию течения. Характерный поперечный размер спиральной структуры 0.36 \div 0.51 см.

Сравнение форм осевого сечения поверхности жидкости на близких частотах при различных количествах несмешивающейся примеси представлены на рис. 9. На больших частотах вращения диска-активатора ($\Omega = 750$ об/мин) в чистой жидкости ($H = 40$ см, $R = 7.5$ см) образуется каверна (рис. 9, кривая 1), глубина которой составляет $h_t = 11.8$ см. При добавлении 30 мл подсолнечного масла большая часть примеси оказывается сосредоточенной внутри центральной области, ограниченной сверху поверхностью вращения глубиной $h = 10$ см (рис. 9, кривая 2), т. е. меньшей, чем глубина каверны в чистой жидкости, высота масляного тела составляет $h_k = 7.8$ см (рис. 9, кривая 3). Хотя поверхность воды покрыта пленкой масла, линия контакта масляного тела с поверхностью воды идентифицируется достаточно четко.

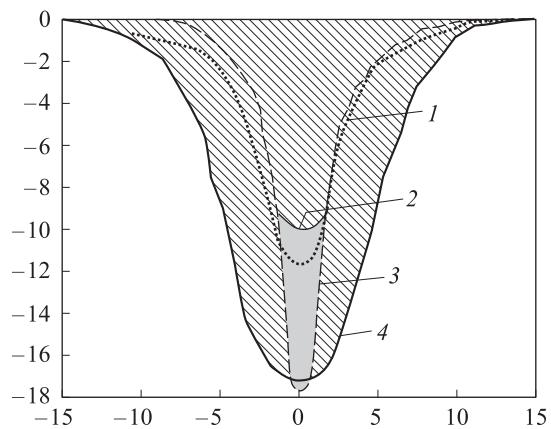


Рис. 9. Формы поверхностей раздела масло–вода и жидкость–воздух в составном вихре ($H = 40$ см, $R = 7.5$ см): 1 — чистая вода, $\Omega = 750$ об/мин; 2 — $V_k = 30$ мл — граница масляного тела, $\Omega = 770$ об/мин; 3 — $V_k = 30$ мл — граница жидкость–воздух, $\Omega = 770$ об/мин; 4 — $V_k = 2000$ мл — граница масляного тела, $\Omega = 720$ об/мин

При добавлении на поверхность покоящейся воды большого объема $V_k = 2000$ мл несмешивающейся примеси в экспериментальной установке возникает система двухслойной жидкости со свободной поверхностью масло–воздух (рис. 9, кривая 4). Высота масляного тела вращения существенно больше глубины каверны в чистой жидкости $h_t = 17.34$ см (рис. 9, кривая 4). При таких условиях опыта и низких частотах вращения активатора исчезает контактная линия масло–вода–воздух.

Заключение

Проведены экспериментальные исследования структурной устойчивости механизмов переноса вещества в составных вихревых течениях. Как растворимые красители, так и несмешивающиеся жидкости (масла) образуют спиральные рукава, составляющие картину переноса вещества на вращающейся поверхности жидкости. Направления основного течения и роста спи-

ральных рукавов противоположны. Рост спиральных рукавов происходит во всем диапазоне исследованных параметров течения.

Во всех проведенных экспериментах примесь не может считаться пассивной, смещения отдельных полос примеси, положения капель масла и ориентация спиральных рукавов не отражают картину течения в составном вихре. Все наблюдаемые картины течения устойчиво воспроизводятся в пределах точности опытов.

Наблюдаемые особенности распределения маркера, который сохраняется в спиральных рукавах, разделенных полосами чистой воды в лабораторных вихрях, согласуются с картинами течений в природных условиях. Теория таких процессов в настоящее время не разработана.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (госконтракт № 16.518.11.7059).

Список литературы

1. Алексеенко С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. Новосибирск, 2003.
2. Ламб Г. Гидродинамика. М., 1947.
3. http://www.znayki.com/blog/archives/16-Kosmicheskij_teleskop.html
4. http://www.koryagin.newmail.ru/belt_theory.htm
5. Милн-Томсон Л.М. Теоретическая гидродинамика. М., 1964.
6. Кошель К.В., Пранц С.В. Хаотическая адвекция в океане. М., 2008.
7. Резник Г.М. // Физика атмосферы и океана. 2010. **46**, № 6. С. 846.
8. Рыжов Е.А., Кошель К.В. // Физика атмосферы и океана. 2010. **46**, № 2. С. 204.
9. Кухарец В.П., Налбандян О.Г., Шмаков А.В. // Физика атмосферы и океана. 2009. **45**, № 4. С. 443.
10. Taylor G.I. // Roy. Soc. Proc. A. 1921. **100**, N Pl.2. P. 114.
11. Long R.R. // J. Atm. Sci. 1954. **11**, N 3. P. 247.
12. Ван-Дайк М. Альбом течений жидкости и газа. М., 1986.
13. Бэтчелор Дж. Введение в динамику жидкости. М., 1973.
14. Чаплина Т.О., Степанова Е.В., Чашечкин Ю.Д. // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2011. № 2. С. 52.
15. Монин А.С., Озмидов Р.В. // Турбулентность в океане. Океанология, физика океана. Т. 1. Гидрофизика океана, М., 1978.

Contaminant transport features in stationary vortex flow

T. O. Chaplina^{1,a}, E. V. Stepanova^{2,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. Ishlinskii Institute of Problems in Mechanics, Russian Academy of Sciences, Moscow 119526, Russia.
E-mail: ^atanya75.06@mail.ru, ^bstep@ipmnet.ru, ^cchakin@ipmnet.ru.

The experimental modeling of the admixture transport in vortex currents with the free surface is taken. The evolution of the compact admixture spot (aniline ink or sunflower oil) into spiral arms on the free surface of the vortex driven by the rotating disk at the bottom of cylindrical container is observed. The parameters of the basic structure elements of the current are estimated. The general spiral flow geometry is stable under all the experimentally checked conditions.

Keywords: compound vortex, admixture, spiral arms.

PACS: 92.05.Bc.

Received 17 December 2011.

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

Сведения об авторах

1. Чаплина Татьяна Олеговна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 434-14-87, e-mail: tanya75.06@mail.ru.
2. Степанова Евгения Вячеславовна — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; тел.: (495) 434-14-87, e-mail: step@ipmnet.ru.
3. Чашечкин Юлий Дмитриевич — докт. физ.-мат. наук, профессор, зав. лабораторией ИПМ РАН; тел.: (495) 434-01-92, e-mail: chakin@ipmnet.ru.