

УДК 551.46

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕНОСА МАСЛА В СОСТАВНОМ ВИХРЕ

Е. В. Степанова, Т. О. Чаплина, Ю. Д. Чашечкин

Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, 119526 Москва  
E-mail: chakin@ipmnet.ru

Проведены эксперименты по изучению переноса масла в составном вихре, создаваемом диском, равномерно вращающимся в цилиндрическом контейнере. Обнаружено, что на поверхности жидкости в окрестности оси вращения легкое масло собирается в пятно со спиралевидными рукавами или распадается на отдельные вытянутые капли, причем спиралевидные рукава вытягиваются в направлении, противоположном направлению вращения жидкости. В толще жидкости в окрестности оси ее вращения масло собирается в компактное тело. Определены геометрические параметры структурных составляющих течений.

Ключевые слова: составной вихрь, перенос вещества, примесь.

**Введение.** Вихревые течения широко используются в различных технологических процессах с целью разделения несмешивающихся жидкостей, в частности воды и нефти в местах добычи, а также для уменьшения объема транспортируемых материалов и очистки топлива для различных двигателей [1]. Конструкции установок разрабатываются с учетом действия гравитационных, центробежных и кориолисовых сил, определяющих основное направление переноса примеси. Эффективность технических устройств, характеризующаяся различными критериями: полнотой извлечения примеси, величиной расхода, энергозатратами, — зависит от особенностей конструкции аппаратов. Поскольку используемые устройства весьма разнообразны, до настоящего времени не выработаны обоснованные рекомендации, позволяющие оптимизировать их конструкцию.

Исследование переноса вещества в вихревых течениях имеет не только практическое, но и теоретическое значение. Среди различных типов вихревых течений наиболее активно изучаются вихревые кольца, которые наблюдаются в геофизических течениях и технических установках [2, 3]. Нестационарность движения вихревых колец затрудняет их экспериментальное изучение и получение универсальных закономерностей.

Стационарные вихревые течения образуются в вихревых камерах при тангенциальном вводе жидкости или газа [4] либо при закрутке потока вращающимися телами (обычно применяется диск в замкнутой камере [5]). Удобная для проведения исследований модификация распространенного метода создания вихревых течений вращающимся диском в контейнере со свободной поверхностью предложена в [6]. При наличии свободной поверхности, форма которой соответствует распределению давления в движущейся жидкости, можно легко вводить различные маркеры в выбранные на ней области.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственный контракт № 16.518.11.7059) и при частичной финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых (грант № МК 4650.2011.1).

© Степанова Е. В., Чаплина Т. О., Чашечкин Ю. Д., 2013

Эксперименты показывают, что растворимая более тяжелая примесь не является пассивной и ее перенос на поверхности и в толще жидкости представляет собой сложный процесс. Из компактного пятна, помещенного в произвольную точку на поверхности, вытягиваются два спиралевидных рукава [6]. Если пятно вносится в центр каверны на поверхности, из него вытягивается один спиралевидный рукав [7]. В толщу жидкости краситель переносится вдоль винтовых линий на поверхности цилиндра, диаметр которого зависит от начального положения пятна и продолжительности процесса [8].

Отдельные эксперименты, выполненные при добавлении в поток касторового или подсолнечного масла, более легкого, чем вода, показали, что масло также образует на поверхности вихря расходящиеся спиралевидные рукава и собирается в компактное тело в толще жидкости [9]. Полученную структуру будем называть составным вихрем.

Целью данной работы является изучение процесса распространения несмешивающейся примеси из компактного пятна в установившемся вихревом течении. При этом представляет интерес более детальное исследование влияния объема внесенного масла на картину течения. Изучается перенос масла в цилиндрическом контейнере, вихревое течение в котором создается вращающимся диском.

**1. Экспериментальная установка.** Экспериментальные исследования проводились на установке “Вихревые течения с кручением”. Вихревое течение создавалось вращающимся диском, установленным в центре дна прозрачного цилиндрического контейнера радиусом  $R_0 = 0,147$  м. Для уменьшения оптических искажений контейнер помещался в открытый прямоугольный бассейн из прозрачного полиметилметакрилата, имеющий размеры  $0,60 \times 0,45 \times 0,70$  м. Поверхность диска вместе с фальшдном составляла плоскость, ограничивающую рабочий объем установки. Диск приводился во вращение установленным снизу электромотором, вал которого был введен в бассейн через гермоввод. Частота  $\Omega$  вращения вала двигателя (и соответственно диска) измерялась с помощью оптического датчика с цифровым частотомером. В данных опытах она находилась в диапазоне от 3 до  $35 \text{ с}^{-1}$ .

В каждой серии опытов бассейн заполнялся до заранее выбранного уровня дегазированной водопроводной водой комнатной температуры.

Рабочий объем жидкости освещался через матовый рассеиватель осветителем Raylab Xenos RH-1000. Оптическая регистрация картины течения велась с различных направлений. Состояние свободной поверхности регистрировалось фото- или видеокамерой, закрепленной на настенном штативе. Второй комплект фото- или видеоаппаратуры, закрепленный на вертикальном штативе, служил для регистрации картины течений в толще жидкости. Более полное описание установки и методики экспериментов приведено в [8].

В проведенных опытах пятно несмешивающейся жидкости (подсолнечное или касторовое масло) выбранного объема  $V_k$  помещалось на поверхность покоящейся воды, которая затем приводилась в стационарное вращение. Физические характеристики рабочих сред приведены в таблице ( $\rho$  — плотность,  $\eta$  — кинематическая вязкость,  $\sigma$  — поверхностное натяжение на границе сред жидкость — воздух). Легкое, маловязкое подсолнечное масло характеризуется наименьшим значением поверхностного натяжения, касторовое масло является более вязким и плотным.

Физические характеристики рабочих сред при  $T = 18 \text{ }^\circ\text{C}$

Компонент смеси	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\eta \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	$\sigma$ , мН/м
Вода	998,9	1,05	73,00
Касторовое масло	965,0	1090,80	36,40
Подсолнечное масло	925,0	60,60	33,06

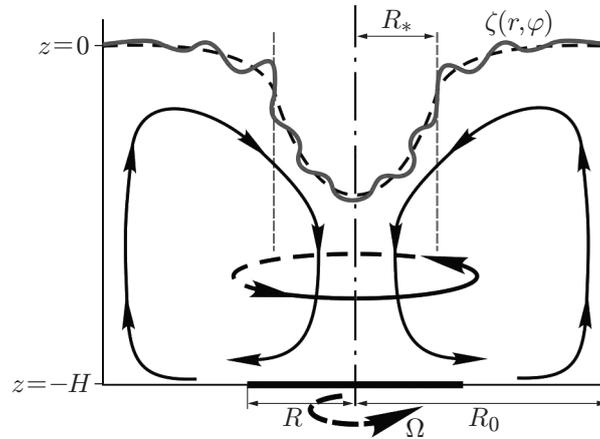


Рис. 1. Схема вихревого течения, индуцируемого диском, вращающимся в центральном сечении цилиндрического контейнера:  
сплошная линия — форма свободной поверхности, штриховая — ее нулевое приближение (без учета наличия волн)

**2. Параметры изучаемого течения.** Схема изучаемого течения с основными компонентами приведена на рис. 1. Глобальное вращение жидкости в контейнере с угловой скоростью  $\omega_c$  вокруг вертикальной оси возникает вследствие увлечения жидкости вращающимся диском (граничное условие прилипания). Тороидальный вихрь, в котором частицы жидкости вращаются с локальной угловой скоростью  $\omega_t$ , формируется вихревой пленкой, сходящей с кромки диска. В этом вихре круговая ось расположена горизонтально, жидкость поднимается вблизи стенки контейнера и опускается в центре цилиндра. Возникающее сложное пространственно-неоднородное течение, в котором частицы жидкости движутся по спиральным и винтовым траекториям, характеризуется локальной частотой  $\omega = \omega_c + \omega_t$ .

На поверхности жидкости, вовлеченной в вихревое течение, образуется каверна радиусом  $R_*$ , форма которой определяется совместным действием инерционных, гравитационных и центробежных сил (см. рис. 1). Положение центра каверны, которое может не совпадать с осью контейнера  $z$ , и ее глубина зависят от значений всех параметров эксперимента: толщины слоя жидкости  $H$ , радиуса контейнера  $R_0$ , радиуса  $R$  и частоты  $\Omega$  вращения диска, ускорения свободного падения  $g$ , плотности  $\rho$ , кинематической вязкости  $\nu$  и поверхностного натяжения  $\sigma$  жидкости. Из указанных величин можно формировать следующие безразмерные параметры: числа Рейнольдса  $Re = R^2\Omega/\nu$ , Фруда  $Fr = R^2\Omega^2/(gH)$ , Вебера  $We = \rho L^3\Omega^2/\sigma$ , а для двухслойной среды (вода — масло) — также числа Бонда  $Bo = gH^2(\rho_1 - \rho_2)/\sigma$  и Атвуда  $A = (\rho_1 - \rho_2)/(\rho_1 + \rho_2)$  ( $\rho_1, \rho_2$  — плотности составляющих жидкостей) [8].

Варьирование толщины слоя жидкости, размеров и частоты вращения диска позволяет изучать воспроизводимую картину вихревого течения в широком диапазоне значений параметров:  $Re = 50 \div 10^5$ ,  $Fr = 0,01 \div 15,00$ ,  $We = 0,02 \div 300,00$ ,  $Bo = 0,15 \div 2,00$ ,  $A = 15 \cdot 10^3 \div 40 \cdot 10^3$ ,  $\xi_H = R/H = 0,08 \div 3,00$ ,  $\xi_0 = R/R_0 = 0,3 \div 1,0$ ,  $\xi_b = 2R_k/h_k = 0,01 \div 3,00$ ,  $L_\Omega = g/\Omega^2 = 25 \div 4 \cdot 10^3$  м,  $\delta_\Omega = \sqrt{\nu/\Omega} = 2 \cdot 10^{-4} \div 6 \cdot 10^{-4}$  м. При значениях  $\xi_H \ll 1$  контейнер считается мелким, а при  $\xi_H \gg 1$  — глубоким.

Форма каверны искажалась волнами различного типа (инерциальными, гравитационными, капиллярными), амплитуда и длина которых зависят от условий экспериментов [9]. Совпадение характерных частот волн различного типа может приводить к возникновению

резонанса. В течении, наблюдающемся в контейнере, имеются крупно- и мелкомасштабные составляющие.

С учетом геометрии задачи описание проводилось в цилиндрической системе координат, где вертикальная ось  $z$  направлена противоположно направлению действия силы тяжести и совпадает с осью контейнера, свободная поверхность в невозмущенном состоянии совпадает с плоскостью  $z = 0$  (см. рис. 1). Возмущение уровня свободной поверхности жидкости описывается функцией смещения  $\zeta(r, \varphi, t)$  ( $r$  — расстояние от центральной вертикальной оси;  $\varphi$  — угловая координата).

В число характерных параметров задачи входят масштабы  $L_\Omega = g/\Omega^2$  и  $L_\omega = g/\omega^2$ . Мелкомасштабную структуру течения (сингулярно возмущенные компоненты включая пограничный слой Стокса) характеризуют микромасштабы  $\delta_\Omega = \sqrt{\nu/\Omega}$  на диске и  $\delta_\omega = \sqrt{\nu/\omega}$  на других контактных поверхностях, граничащих с вращающейся жидкостью.

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

**3. Свободная поверхность составного вихря.** При сравнительно низких частотах вращения диска-активатора форма каверны на поверхности чистой воды гладкая. Глубина воронки монотонно увеличивается по направлению к ее центру, нижняя часть имеет параболическую форму, типичную в случае твердотельного вращения жидкости. С увеличением частоты вращения диска форма свободной поверхности усложняется, на ней появляются крупномасштабные возмущения большой амплитуды, которые называются инерциальными волнами [10]. Возмущения в центральной части каверны имеют заостренные гребни, разделенные пологими впадинами.

При дальнейшем увеличении частоты вращения на поверхности помимо крупномасштабных инерциальных волн появляются мелкомасштабные спиральные волны. Во всех трех рассмотренных режимах течения форма поверхности жидкости на участках, примыкающих к стенкам цилиндрического контейнера, существенно не изменяется.

Добавление легкого масла на поверхность жидкости приводит к изменению формы свободной поверхности в целом и геометрии каверны. Форма пятна существенно изменяется в процессе вовлечения воды с добавлением масла в вихревое течение.

Перед началом раскручивания активатора масло растекается в пятно круглой формы и практически постоянной толщины, расположенное в центре свободной поверхности внутри цилиндрического контейнера.

В момент начала вращения диска вместе с рабочей жидкостью начинает раскручиваться масляное пятно, форма которого при этом становится асимметричной. На внешнем контуре пятна появляются выступы и участки с отрицательной кривизной. Толщина пятна, увеличивающаяся на периферии, становится неоднородной.

Со временем асимметрия формы пятна увеличивается, из него вытягиваются спиралевидные рукава, от кромок которых отделяются капли масла. Удлинение спиралевидных выступов на внешней кромке пятна происходит в направлении, противоположном направлению вращения диска и свободной поверхности.

Следует отметить, что площадь пятна в установившемся вихревом течении значительно меньше его первоначальной площади, поскольку часть масла оказывается затянутой в толщу рабочей жидкости, где образуется сплошное “масляное тело”.

**4. Геометрия “масляного тела” внутри составного вихря.** Фотография течения с “масляным телом” в толще жидкости приведена на рис. 2. “Масляное тело” располагается в центральной части контейнера, его поверхность, как и поверхность каверны в чистой воде, имеет вогнутую форму. Несмотря на то что основная часть масла собирается в “масляное тело”, на свободной поверхности рабочей жидкости сохраняются как отдельные

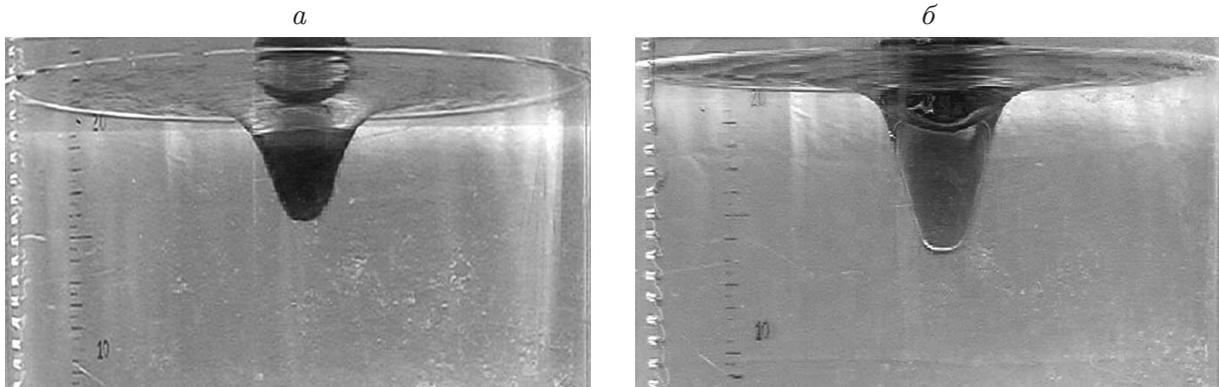


Рис. 2. Вид “масляных тел” сбоку ( $H = 0,2$  м,  $R = 7,5$  см,  $\Omega = 5,3$  с $^{-1}$ ,  $Re = 490$ ,  $Fr = 0,08$ ):  
 а —  $V_k = 30$  мл; б —  $V_k = 150$  мл

капли масла, так и масляная пленка, занимающая часть или всю свободную поверхность жидкости. Однако во всех случаях линия пересечения боковой поверхности “масляного тела” и поверхности воды идентифицируется достаточно четко и является верхней границей “масляного тела”.

Устойчивость идентификации положения контактных поверхностей вода — воздух, масло — воздух, масло — вода и линий их пересечения (см. рис. 2) в тот момент, когда практически вся порция масла собралась в тело вращения, позволяет определить геометрические характеристики течения: радиус линии контакта “масляного тела” с поверхностью раздела фаз  $R_k$ , высоту “масляного тела” в центре  $h_k$ , максимальную толщину слоя рабочей жидкости (отсчитывается от стенки)  $H$ , разность высот  $h_t$ , на которых расположены свободная поверхность вблизи стенки контейнера и нижняя кромка “масляного тела”, прогиб поверхности раздела жидкость — воздух  $h = h_t - h_k$ . Геометрия свободной поверхности и значения указанных характеристик зависят от всех параметров течения.

При умеренных частотах вращения диска ( $\Omega \approx 5$  с $^{-1}$ ) в чистой жидкости образуется гладкая каверна [10]. При добавлении масла его основной объем собирается на оси вихря. На рис. 2 представлены картины распределения масла в толще жидкости для двух различных объемов  $V_k$  при  $Fr = 0,08$ . Небольшой объем подсолнечного масла ( $V_k = 30$  мл) частично заполняет полость каверны (см. рис. 2, а), что приводит к выравниванию прогиба свободной поверхности. Небольшое количество масла распределяется по всей свободной поверхности в форме отдельных вытянутых капель [9].

С увеличением объема масла степень заполнения каверны (отношение  $h_k/h_t$ ) возрастает, соответственно прогиб свободной поверхности уменьшается (см. рис. 2, б). Степень заполнения каверны нелинейно зависит от объема масла, помещенного на свободную поверхность. С увеличением объема легкой примеси площадь поверхности, покрытой отдельными каплями масла на периферии течения, увеличивается.

В экспериментах, проведенных при различных низких частотах вращения диска (менее 6,5 с $^{-1}$ ) в слое чистой воды толщиной  $H = 40$  см с добавлением касторового или подсолнечного масла ( $V_k = 30$  мл), положения свободной поверхности и контактной границы сред масло — вода практически совпадают. “Масляное тело” заполняет каверну, существовавшую в чистой жидкости, и только небольшой объем масла распределяется по свободной поверхности в виде рукавов и отдельных капель. Сравнение вертикальных сечений свободной поверхности (в опыте с чистой водой) и поверхности раздела сред масло — вода (в опытах с добавлением маркирующей примеси) показывает, что при наличии “масляного тела” каверна незначительно сужается.

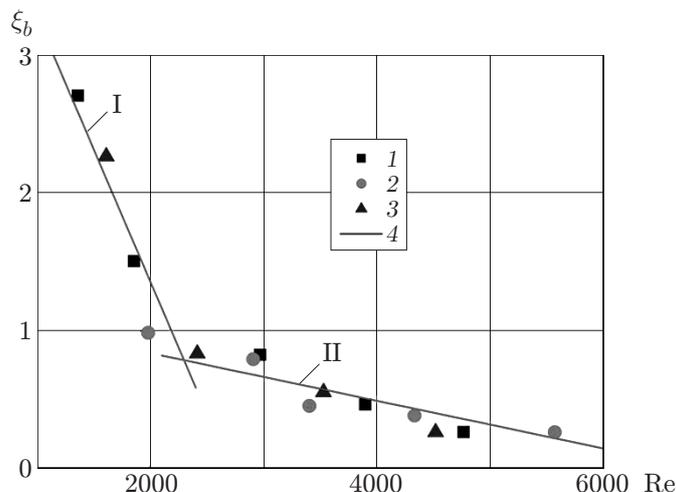


Рис. 3. Зависимость коэффициента  $\xi_b$  от числа Рейнольдса для двух режимов течения: I —  $Re < 2300$ , II —  $Re > 2300$ ; 1 —  $V_k = 30$  мл, 2 —  $V_k = 90$  мл, 3 —  $V_k = 120$  мл, 4 — эмпирические зависимости

В аналогичном эксперименте при увеличении объема масла до значения  $V_k = 60$  мл величина прогиба поверхности раздела фаз практически восстанавливается, в центральной части каверны находится “масляное тело”, на периферии — вода. Для описанных условий опытов число Фруда изменяется в диапазоне от 0,04 до 0,10.

Сохранение формы “масляного тела” при изменении угловой скорости вращения диска позволяет характеризовать относительное изменение размеров этого тела зависимостью коэффициента  $\xi_b = 2R_k/h_k$  от числа Рейнольдса (рис. 3).

В диапазоне значений  $Re = 1000 \div 5500$  эта зависимость представляется в виде линейной функции  $\xi_b = aRe + b$ . При малых числах Рейнольдса ( $Re < 2300$ )  $a = -1,9 \cdot 10^{-3} \pm 4,0 \cdot 10^{-4}$ ,  $b = 5,2 \pm 0,7$ , при больших ( $Re > 2300$ )  $a = -1,7 \cdot 10^{-4} \pm 2,9 \cdot 10^{-5}$ ,  $b = 1,2 \pm 0,1$ . Увеличение скорости вращения диска приводит к увеличению вертикальной компоненты скорости течения в центре контейнера и соответственно к удлинению “масляного тела”.

При больших скоростях вращения диска вертикальный размер “масляного тела” не стабилизируется, его нижняя кромка нерегулярно осциллирует. В тот момент, когда нижняя кромка “масляного тела” касается диска, образуется водомасляная эмульсия, затрудняющая дальнейшее наблюдение.

**5. Форма масляной пленки на поверхности раздела фаз.** На фотографиях свободной поверхности составного вихря с добавлением масла четко видна линия контакта “масляного тела” с каверной, представляющая собой окружность (рис. 4, а). К “масляному телу”, расположенному в толще жидкости, примыкает сплошная пленка масла, от внешнего края которой ответвляются многочисленные узкие спиралевидные рукава. Внешние края рукавов распадаются на отдельные масляные капли вытянутой формы, ориентированные вдоль линий продолжения спиралевидных рукавов. Спиралевидные рукава и группа масляных пятен разделены узкими участками чистой воды.

С увеличением объема масла и толщины слоя рабочей жидкости объем “масляного тела”, радиус поверхности контакта и площадь масляной пленки увеличиваются (рис. 4, б). При этом сама пленка становится неоднородной, поверхность контакта “масляного тела” и каверны приобретает эллиптическую форму. К диаметрально противоположным угловым точкам масляной пленки почти прямоугольной формы примыкают два спиралевидных ру-



Рис. 4. Формы пятна подсолнечного масла на поверхности составного вихря ( $R = 7,5$  см):  
 а —  $H = 0,2$  м,  $\Omega = 5,2$  с $^{-1}$ ,  $V_k = 90$  мл,  $Re = 480$ ; б —  $H = 0,4$  м,  $\Omega = 4,5$  с $^{-1}$ ,  $V_k = 150$  мл,  $Re = 420$

кава, имеющие сложную форму. Поверхность вращается в направлении угловой скорости вращения диска, при этом удлинение спиралевидных рукавов происходит во встречном направлении.

Образование спиралевидных рукавов происходит при всех исследованных значениях скорости вращения диска и толщинах слоя воды с добавлением примеси. Для режимов, в которых образуются тонкие и широкие спиралевидные рукава (см. рис. 4),  $Fr = 0,08$ ;  $0,03$  соответственно. С увеличением частоты вращения размер и время жизни отдельных спиралевидных рукавов уменьшаются.

На периферии свободной поверхности интенсивного течения, когда “масляное тело” имеет вытянутую форму (см. рис. 3), что соответствует значениям  $Re > 2300$ ,  $Fr > 0,5$ , масляные капли и спиралевидные рукава практически отсутствуют, только в центральной части поверхности “масляное тело” является частью поверхности раздела фаз.

**Заключение.** Проведено экспериментальное исследование процесса переноса масла в закрученном течении жидкости. Обнаружено, что одна часть масла образует “масляное тело”, а другая часть остается на свободной поверхности. При этом формируется составной вихрь. К поверхности “масляного тела” примыкают спиралевидные рукава, разделенные участками чистой воды, и группы вытянутых капель.

При малых значениях числа Фруда образование спиралевидных рукавов, вытягивающихся из масляного пятна, расположенного в центре свободной поверхности, происходит более интенсивно.

При малых значениях числа Рейнольдса коэффициент  $\xi_b$  уменьшается быстро, а при больших — медленно.

При умеренных скоростях вращения прогиб поверхности жидкости (воды на периферии и масла в центральной части) меньше, чем в случае чистой воды.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 2199367 RU, МКИ В 01 D 17/00. Сепаратор для очистки дизельных топлив / Е. И. Болтунов, И. Е. Болтунов. № 2001111981/12; Заявл. 03.05.01; Оpubл. 27.02.03.
2. Бэтчелор Дж. Введение в динамику жидкости. М.: Мир, 1973.

3. **Ахметов Д. Г.** Вихревые кольца. Новосибирск: Изд-во “Гео”, 2007.
4. **Алексеев С. В.** Введение в теорию концентрированных вихрей / С. В. Алексеев, П. А. Куйбин, В. Л. Окулов. Новосибирск: Ин-т теплофизики СО РАН, 2003.
5. **Escudier M. P.** Observations of the flow produced in a cylindrical container by a rotating endwall // Exp. Fluids. 1984. V. 2, iss. 4. P. 189–196.
6. **Степанова Е. В., Чашечкин Ю. Д.** Анизотропный перенос примеси в составном вихре // Докл. АН. 2009. Т. 423, № 4. С. 474–478.
7. **Чаплина Т. О., Степанова Е. В., Чашечкин Ю. Д.** Деформация компактного масляного пятна в каверне составного вихря // Докл. АН. 2010. Т. 432, № 2. С. 185–189.
8. **Степанова Е. В., Чашечкин Ю. Д.** Перенос маркера в составном вихре // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2010. № 6. С. 12–29.
9. **Чаплина Т. О., Степанова Е. В., Чашечкин Ю. Д.** Перенос масла в составном вихре // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2011. № 2. С. 52–64.
10. **Чашечкин Ю. Д., Кистович А. В.** Деформация свободной поверхности жидкости в цилиндрическом сосуде примыкающим составным вихрем // Докл. АН. 2010. Т. 432, № 1. С. 50–54.

*Поступила в редакцию 5/V 2012 г.,  
в окончательном варианте — 16/X 2012 г.*

---