

## ФИЗИКА ЗЕМЛИ, АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

**Структурная устойчивость картины переноса несмешивающихся жидкостей в вихревом течении**Т. О. Чаплина<sup>1,a</sup>, Е. В. Степанова<sup>2,b</sup>, Ю. Д. Чашечкин<sup>2</sup><sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики моря и вод суши. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.<sup>2</sup>Институт проблем механики РАН. Россия, 119526, Москва, пр. Вернадского, д. 101, корп. 1.  
E-mail: <sup>a</sup>tanya75.06@mail.ru, <sup>b</sup>chakin@ipmnet.ru

Статья поступила 04.03.2014, подписана в печать 26.08.2014.

Экспериментально исследованы характеристики переноса несмешивающихся примесей в составном вихре со свободной поверхностью. Прослежены эволюция компактного пятна маркера (подсолнечное масло и дизельное топливо) в спиральные рукава на поверхности составного вихря и образование масляного тела в толще жидкости. Выделены общие элементы в геометрии распределения. Показано, что характер переноса вещества не зависит от свойств примеси в широких пределах изменения ее плотности и вязкости. Полученные экспериментально количественные закономерности переноса вещества могут быть использованы для разработки адекватных физических и математических моделей процессов переноса в вихревых течениях.

*Ключевые слова:* составной вихрь, примесь, спиральные рукава.

УДК: 551.46. PACS: 92.05.Bc.

**Введение**

Рост объема морской добычи и транспортировки нефти сопровождается увеличением объема потерь и загрязнением акваторий. Анализ последствий аварий на крупных нефтедобывающих платформах, сопровождающихся большими утечками тяжелых углеводородов, показал, что загрязняющие вещества могут накапливаться как на свободной поверхности, так и в водной толще [1].

Для контроля степени загрязнения свободной поверхности разработан ряд средств, как контактных, связанных с отбором жидкости, так и дистанционных. С развитием дистанционных средств наблюдения появляется все большее число данных, свидетельствующих, что на свободной поверхности океана нефть собирается в протяженные узкие полосы, обладающие тонкой структурой [2]. Менее развиты исследования поведения нефтяных пятен в водной толще, где они могут перемещаться под действием течений, волн и вихрей, разбиваться на отдельные фрагменты или собираться в компактные объемы, которые медленно деградируют под действием физических, химических и биологических процессов.

Наряду с наблюдениями в окружающей среде процессы переноса несмешивающихся жидкостей в течениях, волнах и вихрях изучаются в лабораторных условиях. Модельные исследования распределения примесей на поверхности вращающихся жидкостей были начаты в начале прошлого века [3] и продолжены после большого перерыва [4]. Длительное время наблюдаемые явления не привлекали внимания теоретиков, что побудило Дж. Бэтчелора поместить их описание в текст фундаментального учебника по гидродинамике [5]. Усилия оказались замеченными и лабораторные исследования переноса вещества в вихревых течениях начали проводиться более регулярно. Установившиеся

вихревые течения в основном изучаются в цилиндрических вихревых камерах различного сечения (кругового, квадратного, нерегулярной формы) при тангенциальном подводе жидкости или газа [6] или закрутке потока вращающимися индукторами (обычно, дисковыми [7]).

В экспериментах, выполненных в последние годы, установлено, что форма поверхности свободной поверхности и границы раздела несмешивающихся жидкостей в вихревых течениях зависят от многих факторов: физических параметров сред, формы и размеров контейнера, вида и положения создающего течение индуктора [8]. В большинстве установок индуктор располагался вблизи верхней крышки [6] или на дне рабочего объема [9]. Осесимметричное течение в цилиндрической камере при больших угловых скоростях вращения индуктора теряет устойчивость, каверна приобретает угловатую форму [10], отражающую изменение симметрии поля скорости течения в толще жидкости [7].

Детальное изучение формы контактных поверхностей (несущая жидкость (вода) — воздух, масло — вода и масло — воздух) показывает, что в течениях представлены как вихревая, так и волновые компоненты [11, 12]. В вихревом течении несмешивающаяся жидкость, плавающая на поверхности воды, затягивается в толщу жидкости. Под действием динамических факторов (волны, вихри) поверхность раздела несмешивающихся жидкостей приобретает сложную форму с разрывами [13]. Форма контактных поверхностей зависит не только от параметров течения, но и от объема несмешивающейся примеси. При высоких угловых скоростях вращения граница раздела теряет сплошность, масляное тело частично распадается на прямую (капли масла в воде) или инвертную (вода в масляной оболочке) эмульсии [14].

Научный и практический интерес представляет сравнительное изучение формы поверхности разде-

ла несмешивающихся жидкостей в вихревом течении в широком диапазоне физических параметров распространяющихся на практике сред. Целью настоящей работы является лабораторное моделирование процессов переноса маркирующей примеси в составном вихре, который создавался вращающимся диском, установленным на дне цилиндрического контейнера. В качестве несмешивающейся примеси использовались рафинированное подсолнечное масло, дизельное топливо и их смесь в равных пропорциях, сходная по свойствам с некоторыми сортами нефти.

**Экспериментальная установка**

Опыты выполнены на стенде моделирования вихревых течений ВТК, входящим в комплекс уникальных установок «ГФК ИПМех РАН». Вихревое течение создавалось вращающимся диском, установленным на дне прозрачного цилиндрического контейнера, приводимым во вращение установленным снизу электромотором. Частота вращения измерялась оптическим датчиком и лежала в диапазоне от 200 до 2000 об/мин. Более подробное описание установки приведено в [9]. Картина течения одновременно регистрировалась через боковую стенку и свободную поверхность цифровыми фото- и видеокамерами.

**Физические параметры задачи**

Размерными параметрами задачи являются глубина, линейная и угловая скорость вращения среды, объем (при частичном покрытии поверхности) или толщина слоя несмешивающихся жидкостей, температуры которых предполагаются одинаковыми.

В нормальных условиях более легкая несмешивающаяся жидкость распределяется по поверхности более

тяжелой, характер ее движения зависит от объема, обеспечивающего полное или частичное покрытие поверхности рабочей среды.

В настоящей работе небольшой объем несмешивающейся примеси (150 мл) собирается в масляное тело, расположенное вокруг вертикальной оси вращения вихря, при малых и умеренных скоростях вращения диска (рис. 1, а). Схематическое изображение картины такого течения представлено на рис. 1, б. Здесь  $H$  — максимальная толщина слоя вращающейся жидкости (отсчитывается около стенки),  $h_1$  — разность высот свободной поверхности и нижней кромки вращающегося объема примеси,  $h_0$  — высота тела вращения,  $R_k$  — радиус линии контакта объема примеси с кромкой каверны. Вихрь создается в цилиндрическом контейнере радиуса  $R_0$  при помощи диска радиуса  $R_d$ , вращающегося с частотой  $\Omega_d$ . Визуально и на фотографиях сбоку хорошо различаются все контактные поверхности: вода — несмешивающаяся примесь, несмешивающаяся примесь — воздух, вода-воздух.

Картина течения зависит от всех параметров эксперимента: свойств жидкостей — плотностей воды  $\rho_w$  и примеси  $\rho_o$ , их кинематических вязкостей  $\nu_w, \nu_o$ , а также коэффициентов поверхностного натяжения на границах вода-воздух  $\sigma_w^a$ , примесь-вода  $\sigma_w^o$  и примесь-воздух  $\sigma_o^a$ ; геометрии экспериментальной установки — радиусов контейнера  $R_0$  и диска-активатора  $R_d$ , частоты  $\Omega_d$  вращения индуктора, толщин слоев невозмущенных жидкостей — полной  $H_t$ , слоя воды  $H_w$  и примеси  $H_o$ , а также ускорения свободного падения  $g$ . Характеристики рабочих сред представлены в табл. 1.

При описании течений наряду с размерными параметрами, характеризующими физические свойства среды, геометрию и динамику течений, широко исполь-

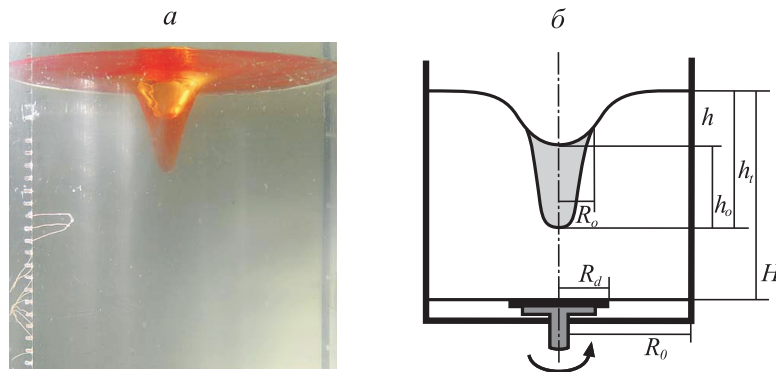


Рис. 1. Составной вихрь с порцией несмешивающейся примеси ( $H = 40$  см,  $R_d = 7.5$  см,  $\Omega_d = 600$  об/мин,  $V_0 = 150$  мл): а — дизельное топливо, б — схема течения

Таблица 1

**Физические характеристики рабочих сред**

Физическая величина при $T = 20^\circ\text{C}$	Вода	Касторовое масло	Подсолнечное масло	Дизельное топливо	Нефть	Морская вода
Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	998.9	965	925	840	800–900	1024
Кинематическая вязкость $\nu$ , м <sup>2</sup> /с	$0.8 \cdot 10^{-6}$	$1090.8 \cdot 10^{-6}$	$60.6 \cdot 10^{-6}$	$1.5 \cdot 10^{-6}$	$0.8 \cdot 10^{-6}$	$0.9 \cdot 10^{-6}$
Коэффициент поверхностного натяжения (среда-воздух) $\sigma$ , мН/м	73	36.4	33.06	25	30	72.74

зуются различные производные величины, имеющие размерность масштабов длины. Характерными для эксперимента являются макроскопический динамический масштаб  $L_{\Omega}^w = g/\Omega_d^2$  и микроскопический диссипативный масштаб Экмана  $\delta_{\Omega} = \sqrt{\nu/\Omega_d}$ .

Наряду с размерными течение характеризуется набором безразмерных параметров геометрической и динамической природы. В первую группу входят отношения радиуса и высоты контейнера  $\xi_H = R_c/H_c$ , коэффициент перекрытия дна бассейна вращающимся диском  $\xi_0 = R_d/R_c$  и отношения толщин слоев  $\xi_F = H_o/H_t$ . При значениях  $\xi_H \ll 1$  контейнер считается мелким, а при  $\xi_H \gg 1$  — глубоким.

К динамическим параметрам относятся числа Рейнольдса  $Re = R_d^2 \Omega_d / \nu_w$ , Фруда  $Fr = R_d^2 \Omega_d^2 / g H_w$ , Вебера  $We = \rho_w H_o^2 \Omega_d^2 / \sigma_w^o$  для нижнего слоя воды и дополнительные, характерные для двухслойной среды (вода-примесь) числа Бонда  $Bo = g H_o^2 (\rho_w - \rho_o) / \sigma_w^o$  и Атвуда  $At = (\rho_w - \rho_o) / (\rho_w + \rho_o)$ .

Предельные значения характерных масштабов и безразмерных отношений в диапазоне условий проведенных экспериментов приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2  
Безразмерные параметры течения

Безразмерные параметры	Экстремальные значения	
	min	max
Рейнольдса $Re = R_d^2 \Omega_d / \nu_w$	50	$1 \cdot 10^5$
Фруда $Fr = R_d^2 \Omega_d^2 / g H_w$	$1 \cdot 10^{-2}$	15
Вебера $We = \rho_w H_o^2 \Omega_d^2 / \sigma_w^o$	0.02	300
Бонда $Bo = g H_o^2 (\rho_w - \rho_o) / \sigma_w^o$	0.15	2.0
Атвуда $At = (\rho_w - \rho_o) / (\rho_w + \rho_o)$	$15 \cdot 10^3$	$40 \cdot 10^3$
Отношения коэффициентов сред		
вязкости $\tilde{\nu} = \nu_o / \nu_w$	57.5	1039
поверхностного натяжения $\tilde{\sigma} = \sigma_o^a / \sigma_w^a$	0.45	0.5

Таблица 3  
Собственные масштабы длины

$L_{\Omega} = g / \Omega_d^2$	25	$4 \cdot 10^3$
$\delta_{\Omega}^{\nu} = \sqrt{\nu_w / \Omega_d}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$

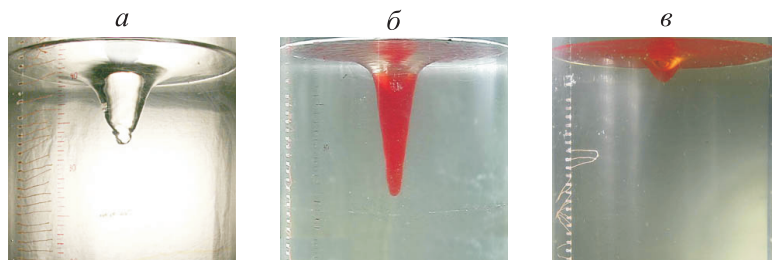


Рис. 2. Эволюция каверны при добавлении несмешивающейся примеси ( $H_0 = 40$  см,  $R_d = 7.5$  см,  $\Omega_d = 600$  об/мин): а — чистая вода, б — подсолнечное масло  $V_0 = 150$  мл, в — дизельное топливо  $V_0 = 150$  мл

Большое число масштабов, имеющих различные количественные значения, свидетельствует о сложной внутренней структуре изучаемого течения, динамика которого зависит от многих факторов. Необходимость визуализации соответствующих разномасштабных структурных компонент учитывалась при разработке конструкции установки и методики эксперимента. Размер установки был выбран достаточно большим, чтобы не влиять на формирование крупных элементов течения, а пространственное разрешение регистрационной аппаратуры — достаточно высоким, чтобы выделять мелкомасштабные компоненты течения.

## Основные результаты

Добавление даже небольшого количества несмешивающейся примеси заметно влияет на общую картину течения и форму поверхностной каверны. При одних и тех же условиях эксперимента в чистой жидкости образуется глубокая каверна (рис. 2, а), боковые стенки которой возмущаются короткими спиральными и более длинными инерциальными волнами, бегущими от краев контейнера к центру воронки (более подробно форма свободной поверхности исследована в [15]). Добавление порции подсолнечного масла ( $V_0 = 150$  мл, рис. 2, б), которое собирается в масляное тело в толще жидкости, приводит к резкому уменьшению глубины прогиба свободной поверхности (в чистой воде  $h_s = 9.1$  см, а с маслом —  $h_s = 16.6$  см,  $h_o = 5.2$  см).

Масло стягивается в компактное тело вращения (полная высота  $h_o = 11.1$  см), часть которого соприкасается с поверхностной каверной. Форма масляного тела при других параметрах течения приводится в [14].

Добавление легкого дизельного топлива  $V_0 = 150$  мл сопровождается уменьшением глубины поверхностной каверны (рис. 2, в), при этом основная масса дизельного топлива остается распределенной вдоль свободной поверхности. Высота масляного тела под центром впадины свободной поверхности существенно меньше, чем для подсолнечного масла при сходных условиях опытов.

Как показали проведенные опыты, динамика и картина распределения масла на поверхности составного вихря зависят от условий эксперимента и свойств примеси (рис. 3, а, б). Легкое маловязкое подсолнечное масло ( $V_0 = 150$  мл), внесенное на поверхность покоящейся жидкости, растекается в пятно правильной формы диаметром 14.5 см и толщиной 2.1 мм, расположенное в центре поверхности воды.

При умеренных угловых скоростях примесь частично остается на поверхности, частично собирается в центральное масляное тело (рис. 3, а, в, для диска

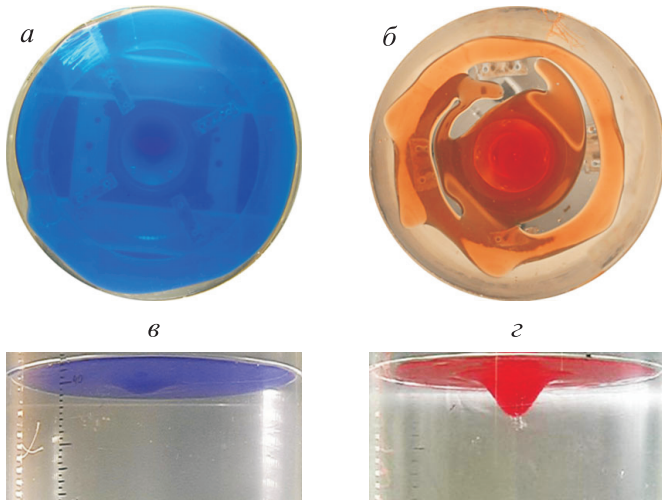


Рис. 3. Распределение подсолнечного масла в составном вихре  $V_0 = 150$  мл,  $H_w = 40$  см. Левый столбец:  $R_d = 5.0$  см;  $\Omega_d = 260$  об/мин; правый столбец:  $R_d = 7.5$  см,  $\Omega_d = 320$  об/мин; а, б — вид сверху, в, г — вид сбоку

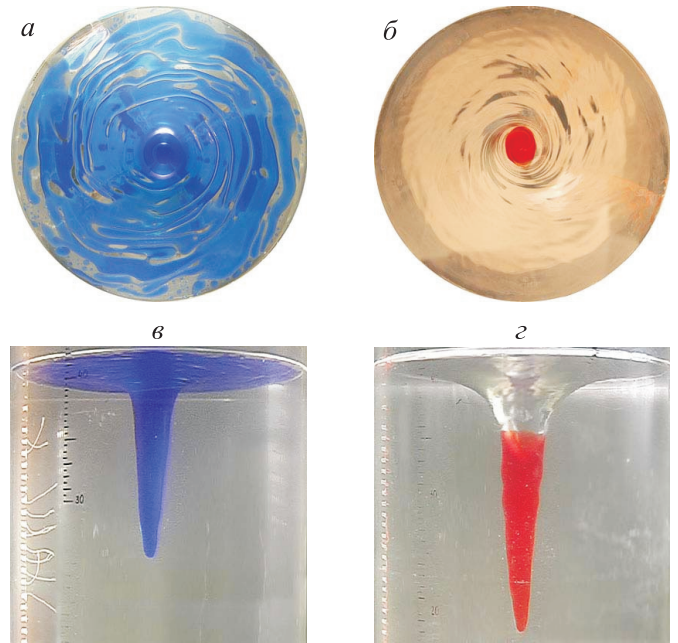


Рис. 4. Составной вихрь с порцией подсолнечного масла  $V_0 = 150$  мл,  $H_w = 40$  см,  $R_d = 7.5$  см: а —  $R_d = 5.0$  см,  $\Omega_d = 320$  об/мин; б —  $R_d = 7.5$  см,  $\Omega_d = 1170$  об/мин, вид сбоку и сверху

малого диаметра  $R_d = 5.0$  см). Высота масляного тела составляет  $h_0 = 2.1$  см, центральное сечение тела вращения аппроксимируется функцией  $r_1 = A_1 h_0^{B_1}$ ,  $A_1 = 2.381 \pm 0.204$ ,  $B_1 = 0.826 \pm 0.130$ . В данных условиях вся поверхность остается покрытой тонкой пленкой масла с небольшим прогибом в центре.

Увеличение диаметра диска заметно проявляется в картине распределения масла (рис. 3, б, г,  $R_d = 7.5$  см). На свободной поверхности появляются четко разделенные спиральные рукава, вытянувшиеся из первоначального масляного пятна, между ними располагаются участки чистой воды. Масляное тело в толще жидкости имеет большие размеры — и высоту  $h_k = 4.9$  см и радиус  $R_k = 3.6$  см. Центральное сечение тела вращения аппроксимируется функцией  $r_2 = A_2 h_0^{B_2}$ ,  $A_2 = 1.722 \pm 0.181$ ,  $B_2 = 0.562 \pm 0.038$ . В данном режиме его боковая поверхность остается гладкой.

С увеличением частоты вращения до 1170 об/мин меняются динамическое состояние основного объема жидкости, структура свободной поверхности и форма отдельных элементов (рис. 4). Основная часть масла со свободной поверхности затягивается в масляное тело, размеры и форма которого зависят от радиуса диска-активатора. В картине течения над диском меньшего радиуса ( $R_d = 5$  см) выражены как масляные спиральные рукава, разделенные тонкими полосками воды, так и протяженное масляное тело. В данных условиях высота масляного тела составляет  $h_0 = 16.6$  см (рис. 4, а), радиус основания  $R_o = 2.75$  см.

Для диска большего радиуса ( $R_d = 7.5$  см) при меньших угловых скоростях вращения вся свободная поверхность очищается от масла, которое стягивается в центральное тело с радиусом основания  $R_o = 2.52$  см и высотой  $h_o = 18.9$  см,  $h_t = 24.8$  см (рис. 4, б). Центральное сечение тела вращения аппроксимируется функцией  $r_3 = A_3 h_0^{B_3}$ , входящие параметры имеют значения  $A_3 = 0.629 \pm 0.341$ ,  $B_3 = 0.622 \pm 0.029$ . Толщина слоя масла, охватывающего воздушную каверну на рис. 4, б, плавно уменьшается с высотой.

### Сравнение характеристик распределения несмешивающихся примесей в составном вихре

Проведенные эксперименты показали, что основные элементы картины течения сохраняются при изменении свойств несмешивающейся примеси. Первоначальное пятно, размещаемое на свободной поверхности, закручивается вместе с потоком в контейнере, примесь формирует утолщение под центром свободной поверхности, в ходе увеличения частоты вращения активатора это утолщение слоя примеси можно уже назвать масляным телом. Масляное тело заполняет область вблизи вертикальной оси течения, под центром свободной поверхности. Свободная поверхность покрыта примесью частично — на ней формируются спиральные рукава и отдельные капли, отделившиеся от них.

Сравнение размеров масляного тела в зависимости от количества и физических свойств добавленной в поток несмешивающейся примеси для различных начальных значений глубины слоя воды показывает, что увеличение вязкости маркирующей добавки ведет к уменьшению вертикального размера масляного тела. Также на вертикальный размер области, занятой несмешивающейся жидкостью в потоке, влияет коэффициент поверхностного натяжения. С его ростом увеличивается глубина втягивания примеси в течение (рис. 5).

На свободной поверхности во всех случаях наблюдается формирование спиральных рукавов, удлинение которых происходит в направлении периферии течения, но с уменьшением коэффициента поверхностного натяжения практически прекращается формирование отдельных капель примеси на свободной поверхности. Также менее выраженными становятся сами спиральные рукава — края сглаживаются.

Для размеров поверхностной каверны и масляного тела в центре построены зависимости от скорости

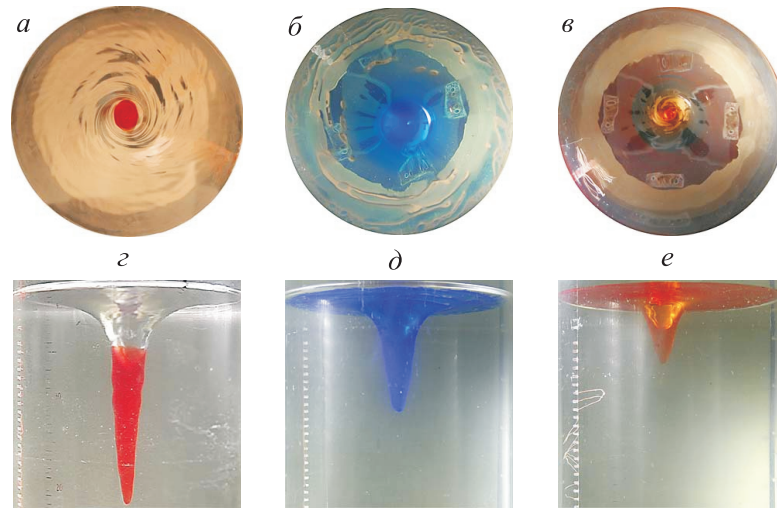


Рис. 5. Картины течения в составном вихре при добавлении  $V_k = 150$  мл несмешивающейся примеси ( $H_w = 40$  см,  $R_d = 7.5$  см): а, г — подсолнечное масло,  $\Omega_d = 770$  об/мин; б, д — смесь равных долей подсолнечного масла и дизельного топлива,  $\Omega_d = 750$  об/мин; в, е — дизельное топливо,  $\Omega_d = 820$  об/мин

вращения активатора, которые интерполируются линейными функциями вида  $h_1 = A\Omega + B$ , входящие в них коэффициенты приведены в табл. 4. Прослеживается четкая тенденция к уменьшению вертикальных размеров масляного тела при уменьшении плотности и коэффициента поверхностного натяжения добавленной в поток примеси, что подтверждается коэффициентами в аппроксимациях.

Таблица 4

**Параметры аппроксимации контура тела несмешивающейся примеси**

	A	B
Масло	$2.31 \pm 0.11$	$-11.66 \pm 3.30$
Масло + дизель	$2.09 \pm 0.27$	$-8.44 \pm 3.56$
Дизель	$1.66 \pm 0.21$	$-7.74 \pm 1.24$

**Выводы**

Проведенные эксперименты показали, что в составном вихревом течении несмешивающиеся жидкости (такие как масло, дизельное топливо) частично остаются на свободной поверхности, частично затягиваются в толщу жидкости, где образуют связанное масляное тело в окрестности оси вращения.

Добавление масла приводит к уменьшению глубины поверхностной каверны, причем, чем более легкое и маловязкое масло, тем мельче каверна и тоньше слой масла под ней.

Сравнение размеров масляного тела в зависимости от количества и физических свойств добавленной в поток несмешивающейся примеси для различных начальных значений глубины слоя воды показывает, что увеличение вязкости маркирующей добавки ведет к уменьшению вертикального размера масляного тела.

Полученные экспериментально количественные закономерности переноса вещества могут быть исполь-

зованы для разработки адекватных физических и математических моделей процессов переноса в вихревых течениях.

Эксперименты проведены на стенде ВТК УНУ «ГФК ИПМех РАН».

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 14-01-00015-а).

**Список литературы**

1. Taylor G.I. // Roy. Soc. Proc. A. 1921. **100**. P. 114.
2. Long R.R. // J. Atmos. Sci. 1954. **11**, N 3. P. 247.
3. Van Dyke M. Parabolic Press, Stanford, 1982; Moscow, 1986.
4. Batchelor G.K. Cambridge: Cambridge University Press, 1967.
5. Рыжов Е.А., Кошель К.В. // Изв. РАН. Физ. атмосферы и океана. 2010. **2**. С. 204.
6. Ахметов Д.Г. Вихревые кольца. Новосибирск, 2007.
7. Алексеенко С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. Новосибирск, 2003.
8. Escudier M.P. // Experiments in Fluids. 1984. P. 189.
9. Ramirez-Leon H., Guerrero-Zuniga A. // Experimental and Theoretical Advances in Fluid Dynamics. 2012. **XXII**. P. 491.
10. Fujimoto S., Murai Y., Tasaka Y., Takeda Y. // J. Visualization. 2010. N 13. P. 17.
11. Чаплина Т.О., Степанова Е.В., Чашечкин Ю.Д. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2012. № 4. С. 69. (Moscow University Phys. Bull. **67**, N 4. P. 391).
12. Степанова Е.В., Чаплина Т.О., Чашечкин Ю.Д. // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2011. № 2. С. 52.
13. Чаплина Т.О., Чашечкин Ю.Д., Степанова Е.В. // Докл. РАН. 2010. **432**. № 2. С. 51.
14. Степанова Е.В., Чаплина Т.О., Чашечкин Ю.Д. // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2014. № 5. С. 52.
15. Чашечкин Ю.Д., Кистович А.В. // Докл. РАН. 2010. **432**, № 1. С. 50.

**The structural stability of the pattern of immiscible fluid transfer in a vortex flow****T. O. Chaplina**<sup>1,a</sup>, **Yu. D. Chashechkin**<sup>2,b</sup>, **E. V. Stepanova**<sup>2,c</sup><sup>1</sup>*Department of Marine and Inland Water Physicss, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.*<sup>2</sup>*Laboratory of Fluid Mechanics, A. Ishlinsky Institute of Problems in Mechanics, Moscow 119526, Russia.**E-mail: <sup>a</sup> tanya75.06@mail.ru, <sup>b</sup> chakin@ipmnet.ru.*

This is an experimental study of the characteristics of the transport of immiscible admixtures in a composite vortex with a free surface. We examined the evolution of a compact marker spot (sunflower oil and diesel oil) into the spiral arms on a composite vortex surface and the formation of an oil body in the fluid. Common elements in the distribution geometry were identified. The character of the transport of matter was shown to be independent of admixture properties in a wide range of variation in its density and viscosity. The experimentally obtained quantitative regularities of the admixture transport can be used for developing adequate physical and mathematical models of transport processes in vortex flows.

*Keywords:* composite vortex, admixture, spiral arms.

PACS: 92.05.Bc.

*Received 3 April 2014.*

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 6(2014).

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