

Моделирование разливов нефти на поверхности воды и метод ликвидации поверхностных загрязнений углеводородами с использованием овечьей шерсти

© 2015. Е. В. Степанова¹, к.ф.-м.н., с.н.с., Т. О. Чаплина², к.ф.-м.н., с.н.с.,

¹Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН,

²Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
e-mail: step@ipmnet.ru, tanya75.06@mail.ru

В работе изложены результаты моделирования распространения вдоль свободной поверхности воды несмешивающихся примесей (нефть, дизельное топливо, подсолнечное и касторовое масло) в составном вихревом течении, описаны результаты применения овечьей шерсти для сбора углеводородов с поверхности покоящейся и вращающейся воды.

Проведённые эксперименты подтвердили структурную устойчивость картины вихревого течения с добавлением порции несмешивающейся примеси. Общие закономерности выявлены в картине течения для всех использованных лёгких несмешивающихся добавок: касторового и подсолнечного масла, дизельного топлива, нефти. Распространение примеси вдоль границы раздела фаз не соответствует предположению о пассивном следовании примеси за течением основной жидкости. На свободной поверхности вихревого течения пятно несмешивающейся добавки трансформируется в спиральные структуры и отдельные капли, направление удлинения спиральных рукавов противоположно основному течению жидкости. В работе выделены факторы, влияющие на параметры масляного тела в толще составного вихря.

Получены данные о способности овечьей шерсти впитывать большие количества нефти, дизельного топлива, жидких масел (касторового, подсолнечного). Проведены измерения скорости очистки поверхности воды от углеводородов, подтверждена прямая зависимость между площадью контакта сорбент – углеводород и полнотой очистки водной поверхности.

The paper outlines results obtained during modeling of the immiscible contaminants (oil, diesel fuel, sunflower and castor oil) propagation along the water free surface in compound vortex flow, and describes the effects of sheep's wool for the hydrocarbons collection from the free surface of quiescent and rotating water.

Experiments confirmed the structure stability of the vortex flow pattern with the portion of light immiscible admixture. General reliance revealed in the flow pattern for all used immiscible additives: castor and sunflower oil, diesel fuel, oil. The distribution of admixtures along the phase boundary does not correspond to the assumption of passive pursue of the admixtures along the flow of base fluid. The spot of immiscible admixture on the vortex free surface is transformed into spiral structure, and separate drops. The spiral arms are stretched in direction opposite to the main fluid flow. The paper summarizes the geometrical characteristics of such flow and the factors affecting oil body form in the depth of the compound vortex flow.

The data obtained on the ability of wool to absorb large quantities of oil, diesel fuel, liquid oils (castor, sunflower). The measurements held to define the rate of water surface clearing from the hydrocarbons, direct dependence between the sorbent-hydrocarbon contact area and cleaning of the water surface corroborated.

Ключевые слова: разливы нефти, вихри, примесь, перенос вещества, сорбенты.

Keywords: oil spills, vortices, admixture, transport of matter, sorbent.

Введение

С начала XX века доля использования углеводородов в мировой энергетике неуклонно растёт и сейчас превышает 33% [1]. Основные потребители жидких углеводородов – промышленно развитые страны (США, Евросоюз, Китай), тогда как основная часть разведанных запасов располагается в Африке, Южной Америке, Аравийском полуострове и в России. Вследствие удалённости регионов добычи от основных потребителей возникает необходи-

мость транспортировки значительных объёмов жидких углеводородов на большие расстояния. Современные требования к обеспечению безопасности морской транспортировки нефти более строги, чем пару десятилетий назад. Их ужесточение связано с авариями нескольких крупнотоннажных танкеров (Prestige, Exxon Valdez, Atlantic Empress и Aegean Captain), сопровождавшимися масштабными утечками нефти, в результате которых, помимо прямых издержек, экосистемы обширных районов Мирового океана были частично уничтожены

(табл. 1). Наиболее существенное деструктивное влияние на экосистемы оказывают разливы нефти на акватории, непосредственно прилегающей к береговой линии. Последствия таких разливов сказываются не только на гидробионтах, а также на флоре и фауне прибрежной зоны. Восстановление биоценозов на таких территориях требует длительного времени (десятилетий) и больших финансовых вложений [2].

Опасность возникновения аварийных ситуаций, приводящих к утечкам нефти в океан, возрастает вместе с увеличением объёмов морских перевозок углеводородов. На сегодняшний день этот объём превышает 2 000 млн тонн в год. В последние годы различными государствами большие усилия прилагаются к усовершенствованию систем предупреждения и ликвидации последствий аварийных разливов нефти и нефтепродуктов, но проблема все же остаётся актуальной. В настоящее время существует несколько методов ликвидации нефтяного загрязнения акватории. После выполнения первого этапа – локализации пятна, приступают к сбору и утилизации.

Наиболее распространённым методом является механический сбор нефтепродуктов после локализации пятна боновыми заграждениями, которые обеспечивают достаточную для сбора толщину слоя нефти. Пятно, окружённое бонами, также можно буксировать в более безопасное и удобное для работы место [3]. Наряду с механическим, широко используется термический метод ликвидации, основанный на выжигании нефти, но область его

применения ограничивается коротким периодом непосредственно после утечки – пока слой имеет достаточную толщину и не образовалась водонефтяная эмульсия.

Физико-химический метод основывается на использовании диспергентов и сорбентов, его использование предполагает, что механический сбор нефти невозможен (при малой толщине плёнки, при наличии непосредственной угрозы экологически уязвимым районам). С применением диспергентов активизируется естественное рассеивание нефти, что облегчает её удаление с поверхности воды. Сорбенты впитывают нефтепродукты, образуя комья материала, которые затем убирают механическими способами. Наиболее тонкую очистку акваторий проводят биологическим методом: особые микроорганизмы перерабатывают нефть и нефтепродукты [4]. Этот метод зачастую применяется, когда возможности физико-химического, механического и других методов исчерпаны.

В целях минимизации негативных последствий разливов нефтепродуктов особое внимание должно быть уделено изучению и совершенствованию способов локализации аварийных разливов, сбору и утилизации углеводородов, а также доработке существующих и разработке новых методик.

Разработкой и совершенствованием технических средств по удалению нефтяных загрязнений длительное время занимаются российские и международные институты и коммерческие компании. В США эту проблему изучают Институт экологических

Таблица 1

Крупнейшие разливы нефти в акватории Мирового океана

Место катастрофы	Год	Название судна/источника утечки	Количество нефти, тыс. тонн
Мексиканский залив	2010	Дипвотер Хорайзон, платформа	460
Аравийское море	2003	Тасман Спирит	60
Бискайский залив	2002	Престиж	90
Аденский залив	2002	Лимбург	300
Средиземное море, Италия	1991	Амоко Хавен	144
Атлантический океан, берега Анголы	1991	АБТ Саммер	260
Индийский океан, ЮАР	1983	Кастило де Бельвер	252
Персидский залив	1983	Новруз	250
Мексиканский залив	1980	Икстоц I, платформа	467
Залив Наварино, Греция	1980	Иренес Серенад	100
Карибское море	1979	Атлантик Эмпресс	290
Атлантическое побережье Франции	1978	Амоко Кадис	223
Оманский залив	1972	Си Стар	115
Острова Силли, Великобритания	1967	Торей Кэньон	119

исследований и Американский институт нефти, в Европе – Международный институт исследований в области окружающей среды, в России – Институт океанологии РАН, Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина, МГУ имени М.В. Ломоносова, Институт проблем нефти и газа РАН, Мурманский морской биологический институт, Российский научный центр экологии моря, Волжский политехнический институт и др.

Сейчас в мире производится и используется для ликвидации разливов нефти около двухсот сорбентов, которые можно отнести к четырём базовым типам: синтетические, неорганические, органоминеральные и природные органические. Эффективность и качество сорбентов определяется их основными характеристиками: ёмкостью по отношению к нефти, степенью гидрофобности, плавучестью после сорбции нефти, возможностью десорбции нефти, наличию механизмов регенерации или утилизации сорбента.

В данной работе авторы предлагают использовать в качестве сорбента сравнительно дешёвое сырьё – овечью шерсть. В настоящее время шерсть в больших количествах стала накапливаться у фермеров как невостребованный товар, который сжигается или закапывается в землю. Эта ситуация усугубляется низким спросом на шерсть как на внутреннем, так и на международном рынках [5]. Шерсть гидрофобна, мало впитывает влагу и обладает высоким коэффициентом адсорбции по отношению к углеводородам, а также их смесям с водой и эмульсиям.

Цель данной работы – моделирование распространения несмешивающихся примесей (нефть, дизельное топливо, подсолнечное

масло) в вихревом течении, а также изучение особенностей взаимодействия овечьей шерсти с нефтью, нефтепродуктами и различными углеводородами и жидкими маслами для последующего применения в качестве сорбента при ликвидации загрязнений на поверхности воды.

1. Моделирование распространения несмешивающихся примесей в вихревом течении.

Экспериментальная часть исследований была проведена на стенде «Вихревые течения с кручением» (ВТК), входящем в комплекс уникальных установок ИПМех РАН (УНУ ГФК ИПМех РАН). Общий вид стенда представлен на рисунке 1 а. Рабочий объём установки ограничен вертикальным цилиндрическим контейнером радиуса R_c , на дне которого вращается диск (или индуктор другой формы). Индуктор радиуса R_d создает сложное течение во всем объёме цилиндрического контейнера вплоть до открытой свободной поверхности. Возможность наблюдения и фиксации структуры течения обеспечивают прозрачные стенки контейнера – регистрацию картины течения можно вести сразу в трёх взаимно-перпендикулярных плоскостях. Основная рабочая среда – пресная вода, её уровень H задаётся отдельно для каждой серии экспериментов.

В объёме установки формировалось составное течение, состоящее из суперпозиции вихря с вертикальной осью и вихря с круговой осью, где частицы жидкости движутся по навитым на тор спиральным и винтовым траекториям. Возникающее в вертикальном цилиндрическом объёме течение сложное и содержит не только вихревые, но и волновые компоненты, и деформирует свободную

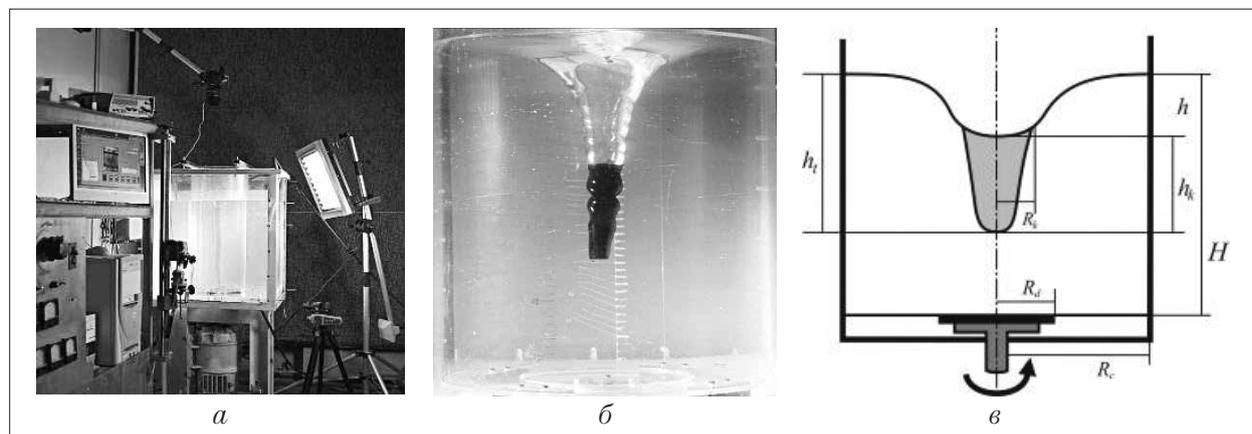


Рис. 1. Фото экспериментальной установки (а), фотография течения с порцией несмешивающейся примеси ($V_o = 150$ мл, $H = 40$ см, $R_d = 7,5$ см, $\Omega_d = 1150$ об/мин) (б), и схема возникающего течения (в).

поверхность. Волны, наблюдавшиеся на поверхности составного вихря, относятся к двум различным типам – инерциальные и спиральные.

В качестве примеси (объёма V_o) использовались касторовое и рафинированное подсолнечное масла, дизельное топливо, нефть. Для улучшения визуализации применялось подкрашивание примесей. Подробное описание и схема установки приведены в [6].

Составное вихревое течение характеризуется набором размерных и безразмерных параметров, значения которых приведены в таблице 2, где ρ_i – плотность соответствующей жидкости, Ω – частота вращения диска-индуктора, g – ускорение свободного падения, ν – кинематическая вязкость воды, σ – коэффициент поверхностного натяжения, L_Ω – характерный макроскопический масштаб длины, δ_Ω – масштаб пограничного слоя Стокса на поверхности вращающегося диска.

Исследования распространения несмешивающихся примесей (подсолнечного масла, дизельного топлива) в составном вихре приведены в [7, 8] и указывают на активный характер поведения несмешивающейся добавки, распространение которой вдоль поверхности раздела фаз не соответствует средней скорости течения основной жидкости. На свободной поверхности жидкости, вовлечённой в составное вихревое течение, пятно несмешивающейся добавки трансформируется в спиральные структуры и отдельные капли, направление удлинения таких спиральных рукавов противоположно основному течению жидкости.

Проведённые дополнительно исследования с добавлением в вихревое течение различных объёмов сырой нефти указывает, что

базовые элементы картины течения сохраняются. Примесь также собирается в масляное тело в толще вихревого течения, на поверхности вихря формируются спиральные рукава и отдельные вытянутые пятна, разделённые полосами чистой воды (рис. 2).

Сравнение вертикальных размеров масляного тела в зависимости от количества и физических свойств добавленной в поток несмешивающейся примеси для различных начальных значений глубины слоя воды показывает, что уменьшение вязкости маркирующей добавки ведёт к уменьшению вертикального размера масляного тела. Также на вертикальный размер области, занятой несмешивающейся жидкостью в потоке, помимо скорости вращения активатора, влияет коэффициент поверхностного натяжения [9]. С его ростом увеличивается глубина втягивания примеси в течение (рис. 3).

Как и в случае со смешивающейся примесью [10], направления удлинения спиральных рукавов и основного вращения свободной поверхности противоположны.

2. Ликвидация разливов нефти. Один из наиболее эффективных методов ликвидации разливов нефти – физико-химический – предполагает использование различных сорбентов, помещаемых на поверхность и в толщу воды [11]. Авторы настоящей статьи предлагают использовать в качестве сорбента овечью шерсть. В ходе проведённых экспериментов выяснено, что необработанная овечья шерсть массой $m_w = 1$ г гарантированно впитывает 5 г нефти и других углеводородов (дизельное топливо, подсолнечное масло). Контроль степени очистки поверхности от загрязнений проводился фотометрическим методом на основе сравнения данных с изо-

Таблица 2

Основные параметры течения

Параметр	Минимальное значение	Максимальное значение	Характерное среднее значение
Число Рейнольдса $Re = (R_d^2 \Omega) / \nu$	50	1×10^5	10000
Число Фруда $Fr = (R_d^2 \Omega^2) / gH$	1×10^{-2}	15	5,5
Число Бонда $Bo = gH^2(\rho_1 - \rho_2) / \sigma$	0,15	2,0	1,22
Число Атвуда $A = (\rho_1 - \rho_2) / (\rho_1 + \rho_2)$	15×10^3	40×10^3	0,08
$L_\Omega = g / \Omega^2$	50	4×10^3	$3,9 \times 10^3$
$\delta_\Omega = \sqrt{\nu / \Omega}$	2×10^{-4}	6×10^{-4}	3×10^{-4}

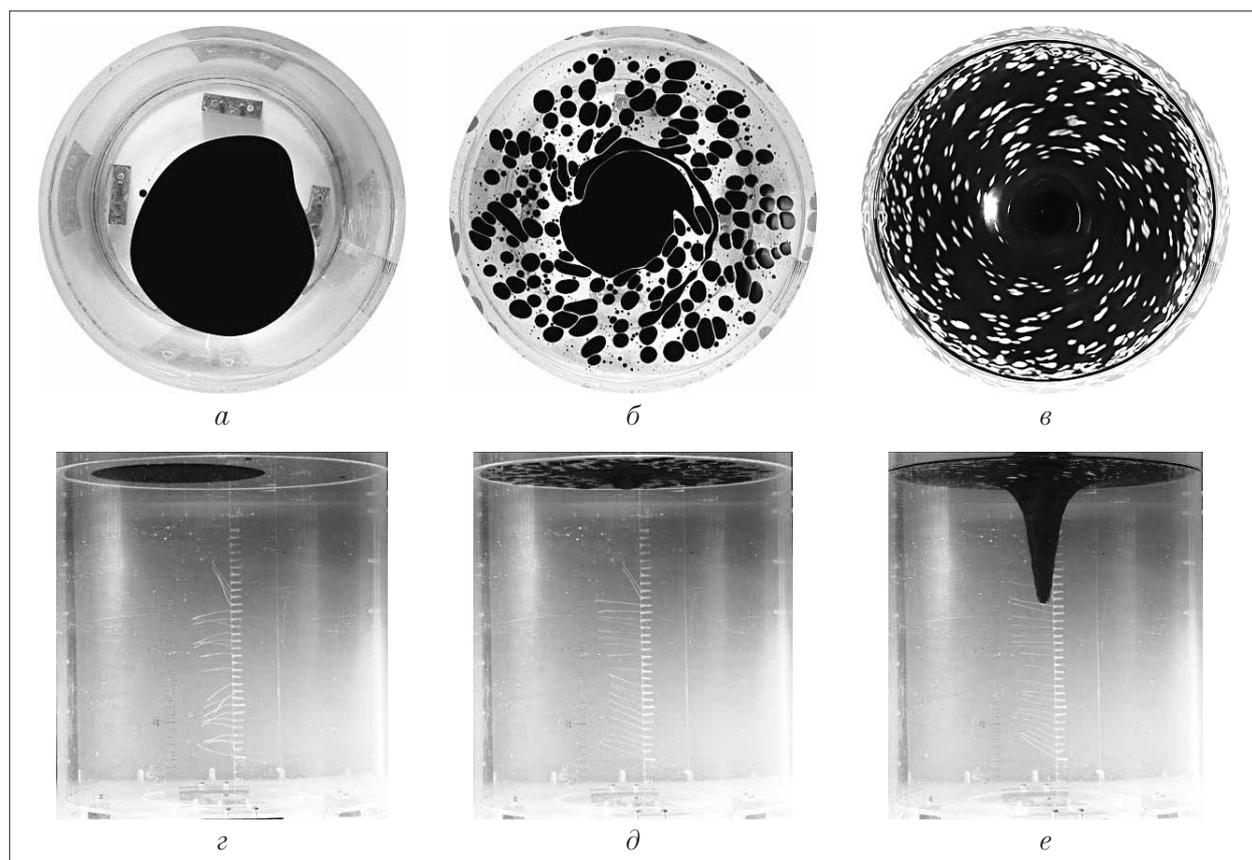


Рис. 2. Изменение картины течения с ростом частоты вращения индуктора при добавлении $V_o = 50$ мл сырой нефти ($H = 40$ см, $R_d = 7,5$ см):
 а - в) $\Omega_d = 200, 560, 930$ об/мин соответственно (вид сверху), г - е) - вид сбоку.

бражения поверхности воды до внесения несмешивающейся добавки и после применения сорбента.

Благодаря гидрофобным свойствам и небольшой плотности овечья шерсть вместе с впитанным веществом не погружается в толщу жидкости, следовательно, такой сорбент легко поддаётся механическому сбору.

Дополнительно было установлено, что овечий очёс (шерсть) способствует коалесценции отдельных капель углеводородов. Важным преимуществом шерсти может стать присутствующий в процессе сорбции эффект «увлечения» углеводородов массой шерсти (автогезия). Перечисленные особенности повышают эффективность отделения углеводородов от воды и их сбор. Волокнистая среда с такими свойствами вызывает разделение эмульсий различного состава. Механизм сорбции основан на том, что волокнистый материал представляет собой поверхность, энергетически отличную от сплошной фазы эмульсии.

Исследования сорбирующей способности шерсти проводились в покоящейся и вращающейся жидкости, состоящей из смеси воды и различных углеводородов (подсолнечного

масла, дизельного топлива, сырой нефти). На поверхность двухкомпонентной жидкости, содержащей $V_o = 50$ мл несмешивающейся примеси, помещались различные количества шерстяных волокон. В зависимости от массы использованной шерсти, значения типичной скорости очистки поверхности и остаточной площади поверхности, покрытой несмешивающейся добавкой, различались. Представлены последовательные изображения процесса впитывания нефти (рис. 4), иллюстрирующие его динамику.

Авторами работы были проведены эксперименты с использованием солёной воды (солёность 35 ‰, что соответствует средней солёности воды Мирового океана), которые показали, что для сбора углеводородов с поверхности воды солёность не является ключевой характеристикой и не влияет на динамику сбора нефтепродуктов, а также на впитывание сорбентом воды и количество поглощённого загрязняющего вещества. С целью снизить расходы на проведение экспериментов все опыты проводились в пресной воде.

Динамика процесса сорбции углеводородов овечьей шерстью представлена на рисунке 5.

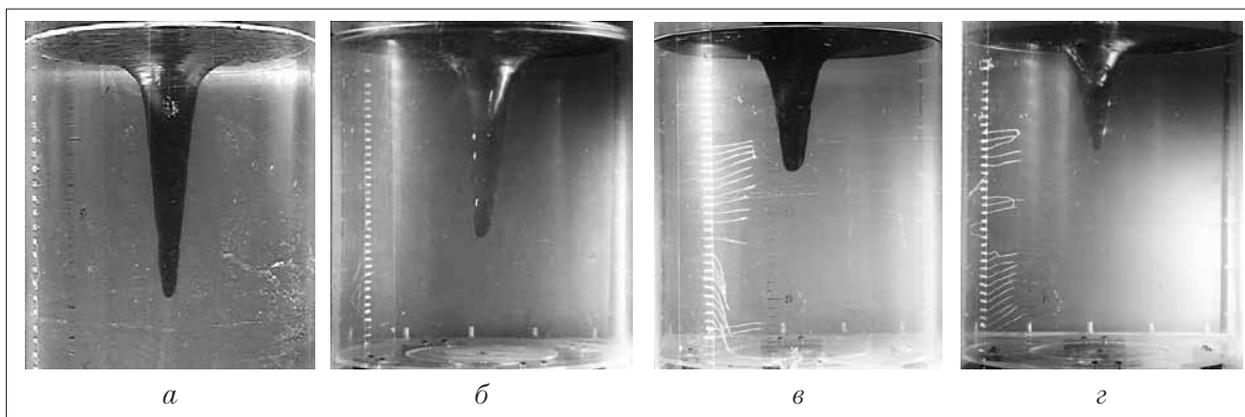


Рис. 3. Различия вертикального размера масляного тела для фиксированных параметров эксперимента ($H = 40$ см, $R_d = 7,5$ см, $\Omega_d = 930$ RPM, $V_o = 150$ мл): *а*) подсолнечное масло, $\eta = 60,6 \times 10^{-6}$ м²/с, *б*) смесь равных долей подсолнечного масла и дизельного топлива $\eta = 31,05 \times 10^{-6}$ м²/с, *в*) нефть, $\eta = 8,14 \times 10^{-6}$ м²/с, *з*) дизельное топливо $\eta = 1,5 \times 10^{-6}$ м²/с.



Рис. 4. Изменение площади поверхностного пятна нефти под действием сорбента ($V_o = 50$ мл, $m_w = 2$ г): *а*, *б*) время после размещения сорбента $t = 10, 210$ с.

Характерные времена, присущие впитыванию нефти шерстью, – десятки секунд. Для приведённого на рисунке 4 случая характерное время уменьшения в e раз площади покрытия поверхности нефтью, вычисленное по аппроксимации данных, полученных на основе метода фотометрии [12], составляет $63,4 \pm 4,9$ с, при увеличении массы сорбента в 1,5 раза характерное время сокращается в десяток раз и составляет уже $6,1 \pm 0,4$ с (рис. 5). На графиках представлены относительные площади очищенной поверхности воды S_r : измеряется отношение первоначальной площади пятна углеводорода к остаточной площади загрязнения, а затем полученное значение вычитается из единицы. В зависимости от использованной массы сорбента величина остаточной площади загрязнения колеблется в пределах 0,1 – 0,5

от первоначальной площади пятна (относительная площадь очищенной поверхности воды составляет 0,5–0,9 соответственно) и зависит не только от массы сорбента, но и от особенностей его размещения. В случае размещения сорбента в несколько слоёв верхние слои оказываются не задействованы в процессе сорбции. Для случаев, представленных на рисунке 5, пороговые значения относительной площади очистки составляют 0,55 и 0,80 соответственно.

Наибольшая площадь поверхности воды, очищаемая от углеводородов, а также наибольшие значения скорости впитывания достигаются при увеличении первоначальной площади покрытия поверхности сорбентом и, конечно, увеличением массы использованного сорбента.

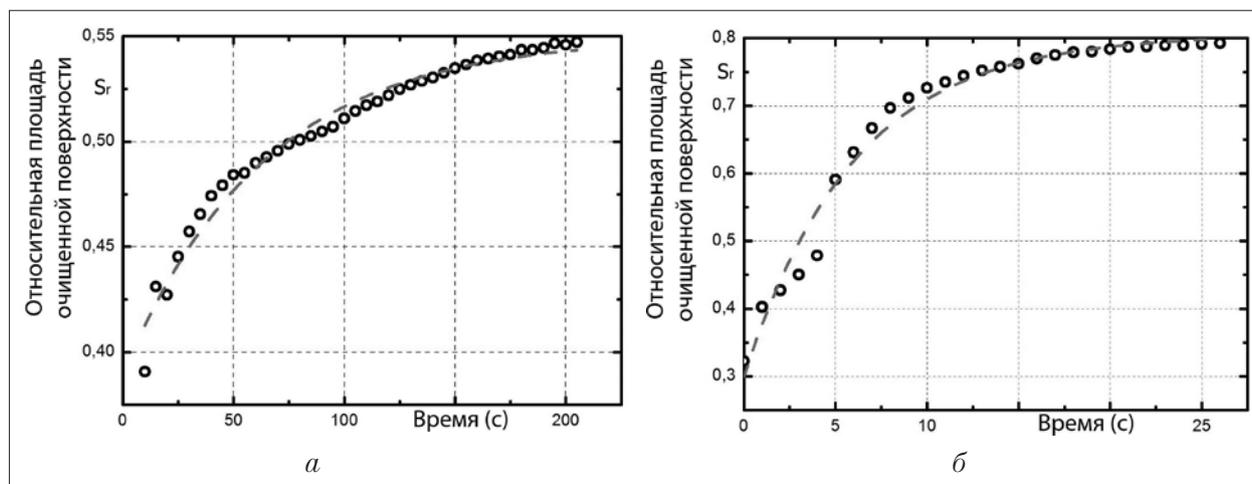


Рис. 5. Зависимость от времени площади, свободной от поверхностного загрязнения (по отношению к размеру начального пятна, $V_o = 50$ мл): а) $m_w = 2$ г; б) $m_w = 3$ г.

Было проведено около 50 экспериментов с добавлением различного количества нефти (10, 20, 30, 40, 50 мл) и выяснено, что необработанная овечья шерсть массой 1 г гарантированно впитывает 5 г нефти, причём благодаря гидрофобным свойствам и небольшой плотности овечья шерсть вместе с впитанным веществом не погружается в толщу жидкости. Данные получены путём измерения массы сорбента до помещения в исследуемый объём жидкости и массы извлечённого сорбента после окончания процесса впитывания, а также усреднены для различных загрязняющих веществ. В литературе встречаются данные [13], что овечья шерсть впитывает более чем десятикратно превосходящую массу нефти, но авторам не удалось добиться подобных значений массы впитываемого загрязняющего вещества.

Использование овечьей шерсти для сбора лёгкой примеси с поверхности составного вихря показало, что сорбент, даже впитавший предельный объём примеси, собирается в центре вращающейся свободной поверхности. Такая особенность вихревого течения позволяет улучшить качество очистки поверхности по сравнению с покоящейся жидкостью. Наличие вращения свободной поверхности не сказывается на сорбционной способности.

На основе эффекта сорбции углеводородов овечьей шерстью была предложена полезная модель устройства для отделения от воды и сбора жидких углеводородов от воды [13], обладающего повышенной сорбирующей способностью. Повышение результативности устройства достигается использованием физико-химических характеристик шерсти в сочетании с механическим сбором угле-

водородов. Предложенная модель включает заполненный натуральной овечьей шерстью каркас, выполненный из пустотелых элементов или сетки, а также систему сохранения положительной плавучести всей конструкции.

Заключение

На основе проведённых экспериментов подтверждена аналогия поведения небольшой порции нефти с другими ранее исследованными несмешивающимися примесями в составном вихре. Обобщены геометрические характеристики такого течения и выделены факторы, влияющие на параметры масляного тела в толще составного вихря.

Экспериментально установлен факт впитывания (без десорбции) овечьей шерстью нефти в количестве, пятикратно превосходящем количество сорбента. Проведены измерения скорости очистки поверхности воды от углеводородов. Прослежена прямая зависимость между площадью контакта сорбента и углеводорода и полнотой очистки водной поверхности.

Литература

1. Анализ ситуации загрязнения окружающей среды нефтепродуктами. Группа компаний «Эксперт». Электронный ресурс <http://www.expertyug.ru/analytics/33-analiz-situacii-zagrjaznenija/>.
2. Владимиров В.А. Разливы нефти: причины, масштабы, последствия // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. 2014. № 1. Т. 4. С. 217–229.
3. Предупреждение и ликвидация аварийных разливов нефти и нефтепродуктов // Охрана окружающей среды, природопользование и обеспечение экологи-

ческой безопасности в Санкт-Петербурге в 2002 году. 2003. С. 302–313.

4. Белик Е.С., Рудакова Л.В., Калашникова М.Е. Оценка эффективности применения биосорбента на основе карбонизата в процессе деструкции углеводородов нефти // Теоретическая и прикладная экология. 2013. № 1. С. 22–26.

5. Основные аспекты исследования четырех секторов отрасли животноводства, сектор шерсти. Отчет Аналитического центра экономической политики в агропромышленном комплексе, 2011. 80 с.

6. Чаплина Т.О., Степанова Е.В., Чашечкин Ю.Д. Особенности переноса примеси в стационарном вихревом течении // Вестник Московского Университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2012. № 4. С. 73–79.

7. Чаплина Т.О., Степанова Е.В., Чашечкин Ю.Д. Деформация компактного масляного пятна в каверне составного вихря // Доклады академии наук. 2010. № 2. Т. 432. С. 185–189.

8. Чаплина Т.О., Степанова Е.В., Чашечкин Ю.Д. Структурная устойчивость картины переноса несмешивающихся жидкостей в вихревом течении // Вестник

Московского Университета. Серия 3. Физика, Астрономия. 2014. № 6. С. 122 – 127.

9. Степанова Е.В., Чашечкин Ю.Д. Перенос маркера в составном вихре // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2010. № 6. С. 12–29.

10. Степанова Е.В., Трофимова М.В., Чаплина Т.О., Чашечкин Ю.Д. Структурная устойчивость процесса переноса вещества из компактного пятна в составном вихре // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. № 5. Т. 48. С. 578–590.

11. Рыбаков С.Н., Майер С.Д., Тарасов А.Г., «Предупреждение и ликвидация разливов нефти и нефтепродуктов». 2011. Электронный ресурс <http://www.ecoguild.ru/docs/2011plarn.htm>.

12. Шевцов Н.И., Степанова Е.В. Применение метода фотометрии изображений в некоторых задачах гидродинамики // Вестник Московского Университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2015. № 3. С. 44–48.

13. Чаплина Т.О., Чашечкин Ю.Д. Патент на полезную модель №136453, Устройство для отделения жидких углеводородов от воды. 2013.