

Теоретическое и экспериментальное исследование эффекта прохождения нефтепродуктов за боновые заграждения

С.А. Ермаков^{1,2}, И.А. Капустин¹, А.А. Мольков¹, Е.М. Сироткин², Е.Ю. Чебан²

¹ *Институт прикладной физики РАН, 603950, Нижний Новгород, 603950, Россия*
E-mails: stas.ermakov@hydro.appl.sci-nnov.ru, kia@hydro.appl.sci-nnov.ru

² *Волжская государственная академия водного транспорта*
Нижний Новгород, 603950, Россия

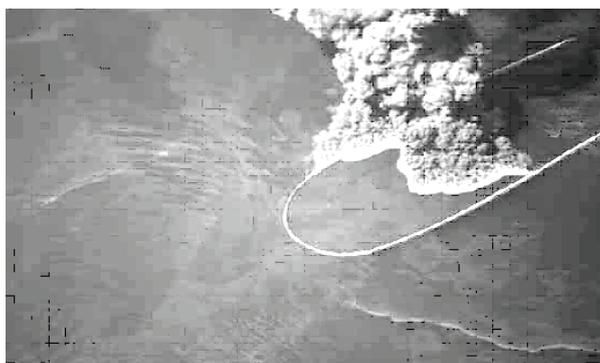
Согласно данным аэрокосмических наблюдений поверхности океана, при попытках локализации и сбора разливов нефтепродуктов с использованием боновых заграждений при некоторых условиях имеет место явление частичного прохождения нефти за заграждения. В настоящей работе приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований эффекта прохождения нефтяной эмульсии за боновые заграждения. Проведены численные расчеты движения частиц (эмульсии) в поле обтекания барьера (бонового заграждения) потоком. Выполнены лабораторные и натурные эксперименты, в ходе которых использовались специальные частицы – имитаторы нефтяной эмульсии, показано хорошее согласие результатов численных расчетов с экспериментом. Наблюдались различные режимы динамики частиц, а именно: удержания частиц барьером при небольших скоростях натекающего потока – при числах Фруда, меньших “критического”; прохождения частиц при больших скоростях в условиях превышения числом Фруда критического уровня. Отмечена важная роль естественной (биогенной) пленки, накапливающейся перед барьером, обтекаемым потоком, установлено, что такая пленка приводит к удержанию “эмульсии” на поверхности воды и ослаблению эффекта переноса частиц за барьер. Обнаружен эффект усиления переноса частиц за барьер в присутствии поверхностных волн. Даны физический анализ динамики частиц в потоке и условий переноса эмульсии за барьер и качественное объяснение результатов численных и физических экспериментов.

Ключевые слова: нефтяная эмульсия, боновые заграждения, течения, пленки поверхностно-активных веществ, поверхностные волны

Введение

Как показывают наблюдения, в том числе аэрокосмические, при попытках локализации и сбора разливов нефтепродуктов с использованием боновых заграждений при их буксировке, либо при установке заграждений поперек потока, при некоторых условиях имеет место явление частичного прохождения нефти за заграждения (*рис. 1*). Поскольку нефтяные пленки, даже при их малой толщине, эффективно подавляют мелкомасштабные поверхностные волны (Ермаков, 2010; Ермаков, Сергиевская, Гушин, 2012), утечки нефти при локализации нефтяных разливов могут уверенно детектироваться, в частности, на оптических и радиолокационных изображениях морской поверхности (Лаврова и др., 2011).

Аналізу физических механизмов прохождения нефти под заграждение и условий, при которых они реализуются, в частности, влияния осадки бона, критического накопления нефти перед препятствием, механизмов увлечения нефти обтекающим потоком и т.д. в литературе уделено значительное внимание (Amini, Bollaert, Biollat et al., 2008; Gong, Tkalich, Xu, 2014). Тем не менее, задача повышения эффективности методов локализации нефтяных разливов пока до конца не решена. Необходимы дальнейшие исследования поля течений в окрестности заграждения, влияния физических характеристик слоя нефтепродуктов на их динамику в поле таких течений, влияния поверхностных волн, ветра и других факторов, а также разработка возможных методов устранения данного негативного явления.



а



б

Рис. 1. Локализация нефтяных разливов с использованием боновых заграждений: а – <http://global.britannica.com/EBchecked/topic/1698988/Deepwater-Horizon-oil-spill-of-2010/296705/Cleanup-efforts>; б – www.miros.no

Отметим, что разливы нефтепродуктов на поверхности воды часто присутствуют в форме эмульсии, образование которой может быть связано с неустойчивостью Кельвина – Гельмгольца на границе раздела вода – нефть (Leibovich, 1976), процессами турбулентного перемешивания, например, при обрушении волн (Tkalic, Chan, 2002) и др.

Большое число исследований относится к численному моделированию поля обтекания заграждения и движения нефти вблизи заграждения. В недавней работе (Gong, Tkalic, Xu, 2014) на основе результатов численных расчетов предложено соотношение между скоростью потока, осадкой бона, начальным объемом нефти и толщиной слоя нефти перед боном для достаточно больших толщин слоя (порядка 0,1 м). При этом, однако, не рассматривалось увлечение нефтяной эмульсии за препятствие полем обтекания.

Результаты численного анализа увлечения всплывающих частиц горизонтальным потоком, обтекающим заграждение, описан в (Lee, Kang, 1997), где частицы «выпускались» под боном на глубине большей, чем его осадка, и накапливались позади бона. Адекватность такой постановки задачи реальной ситуации, отвечающей локализации нефти боновым заграждением на течении, однако, не совсем очевидна. Кроме того, в цитированных работах не учитывалось влияние поверхностных волн, которые могут возбуждаться при обтекании препятствия, либо генерироваться внешними причинами (ветром, буксирующим судном и пр.). Поэтому представляется интересным проведение как экспериментальных, так и теоретических исследований, включая численное моделирование, отвечающих более реальным ситуациям.

В настоящей работе приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований эффекта прохождения нефтяной эмульсии за боновые заграждения. Проведены численные расчеты движения частиц (эмульсии) в поле обтекания барьера потоком. Выполнены лабораторные и натурные эксперименты, в ходе которых нефтяная эмульсия имитировалась частицами с плотностью, близкой к плотности нефти, показано качественное согласие численных расчетов с экспериментом. Отмечена важная роль естественной (биогенной) пленки, накапливающейся перед обтекаемым потоком барье-

ром. Продемонстрировано сильное влияние поверхностных волн на прохождения частиц за барьер, отвечающие условиям экспериментов и показавшие качественное согласие с результатами последних.

Численное моделирование

Численное моделирование поля обтекания барьера однородным горизонтальным потоком и траекторий движения частиц в этом потоке проводилось с использованием программного комплекса моделирования движения жидкости и газа FlowVision. Моделирование течения несущей фазы (воды) на «виртуальном стенде», соответствующем экспериментальной установке опытового бассейна, выполнено в рамках модели турбулентного течения несжимаемой жидкости со свободной поверхностью с использованием k- ϵ модели. Математическая модель, описывающая такое течение, состоит из уравнений Навье – Стокса и уравнений переноса турбулентной энергии и диссипации.

Была разработана твердотельная геометрия установки с размерами, соответствующими размерам экспериментальной установки опытового бассейна (Чебан, Смирнова, 2009; Чебан, 2012). В качестве входных условий на передней стенке установки задавались нормальная скорость и начальная степень турбулизации потока (данные менялись в зависимости от выбранной скорости и модели турбулентности). Задняя и нижняя стенки соответствовали граничному условию выхода аналогично опытной установки в бассейне. На боковых границах канала и поверхности заграждения было задано условие непротекания с турбулентным пограничным слоем, характеризующимся логарифмическим законом изменения касательной компоненты скорости. Геометрия «виртуального стенда» для численных расчетов приведена на *рис. 2*.

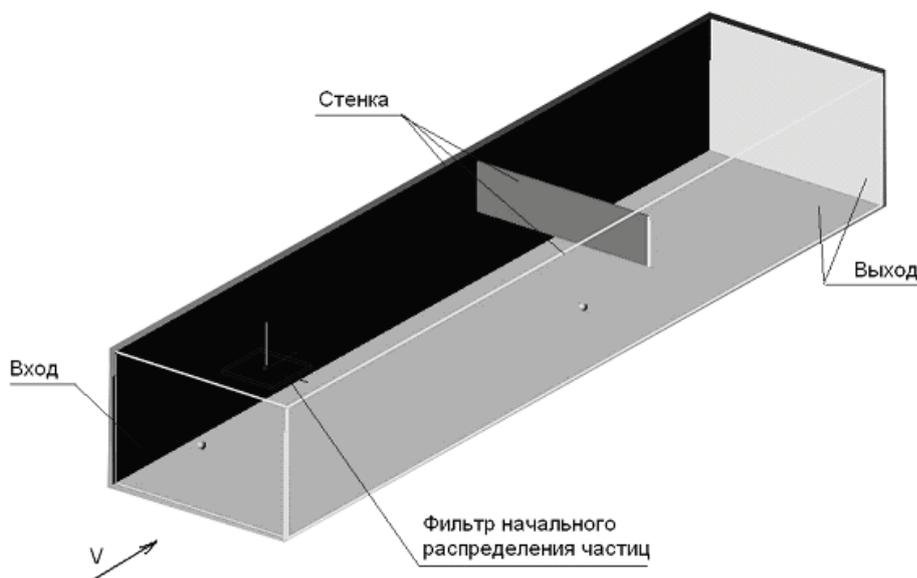


Рис. 2. Схема «виртуального стенда»

Моделирование движения нефтяных капель при установившемся течении несущей фазы проведено с использованием модуля Лагранжевых частиц. Программный комплекс FlowVision позволяет моделировать движение частиц одновременно четырех различных размерных групп. В проведенных расчетах размеры частиц были выбраны в полном соответствии с экспериментом.

Точка выпуска капель моделировалась с помощью фильтра, задающего начальное распределение модельных частиц внутри расчетной области в пределах параллелепипеда с линейными размерами $150 \times 150 \times 5$ мм, расположенного вблизи свободной поверхности на расстоянии 0,25 м от входной границы (рис. 2). Модельные частицы (с плотностью $0,85 \text{ г/см}^3$) выпускались с начальной скоростью, равной местным значениям скорости несущей фазы. Действие силы сопротивления со стороны частиц на несущую фазу не учитывалось в силу малости их количества. При моделировании использовалась неравномерная начальная расчетная сетка, сгущенная в области размещения преграды. Дополнительно, для разрешения возвратной зоны, образующейся за заграждением, проводилась адаптация сетки в объеме параллелепипеда.

Результаты численного моделирования представлялись в виде траекторий движения частиц, векторного поля скоростей, а также данными о количестве частиц, проходящих во времени через плоскость, расположенную перпендикулярно потоку в месте расположения преграды (рис. 3). Кроме того, выполнялась запись изменения с течением времени сил на преграде.

Моделирование проводилось в диапазоне скоростей несущего потока $V = 0,1 - 1 \text{ м/с}$ с шагом $0,1 \text{ м/с}$ и при глубине погружения барьера $h = 10 \text{ см}$ (соответствующие значениям числа Фруда $Fr = V / \sqrt{gh} \approx 0,1 - 1,0$, а денситометрического числа $Fr_d = V / \sqrt{gh(\rho_0 - \rho) / \rho_0} \approx 3 - 30$).

При скоростях обтекающего внешнего потока меньше $0,4 \text{ м/с}$ частицы накапливаются перед барьером и не увлекаются под него (рис. 3а), при больших скоростях возникает эффект увлечения частиц. В частности, как видно из рис. 3б, при скорости $0,5 \text{ м/с}$ частицы движутся практически вдоль барьера вниз и затем вовлекаются в вихревое движение непосредственно за барьером. При дальнейшем увеличении скорости, в частности, при $0,7 \text{ м/с}$, формируется довольно тонкая «струя» из частиц, уносимых далеко за барьер. Отметим, что, как видно из рис. 3в, потоком увлекаются частицы, фактически достигшие барьера. С физической точки зрения такой результат представляется ожидаемым, поскольку вертикальные составляющие скорости обтекающего потока, которые и определяют увлечение частиц, максимальны вблизи барьера.

В качестве условия увлечения частиц потоком вглубь воды можно полагать равенство направленной вниз вертикальной компоненты V_z скорости внешнего потока V и скорости всплытия частиц из-за сил плавучести. Величину последней можно оценить из условия баланса силы сопротивления при обтекании частицы радиуса R $F_c = 1/2 C \pi R^2 \rho_0 V_z^2$ и силы плавучести $F_b = \frac{4}{3} \cdot \pi R^3 (\rho_0 - \rho) g$ (здесь ρ_0 и ρ – плотность воды и частиц, соответственно). Оценка с использованием известной из эксперимента зависимости коэффициента сопротивления C от числа Рейнольдса при обтекании шара $Re = \frac{V_z R}{\nu}$ (ν – кинематическая вязкость воды) для частицы радиуса $0,15 \text{ см}$ дает для величины вертикальной скорости V_z^* , необходимой для увлечения частицы потоком, значение порядка 8 см/с .

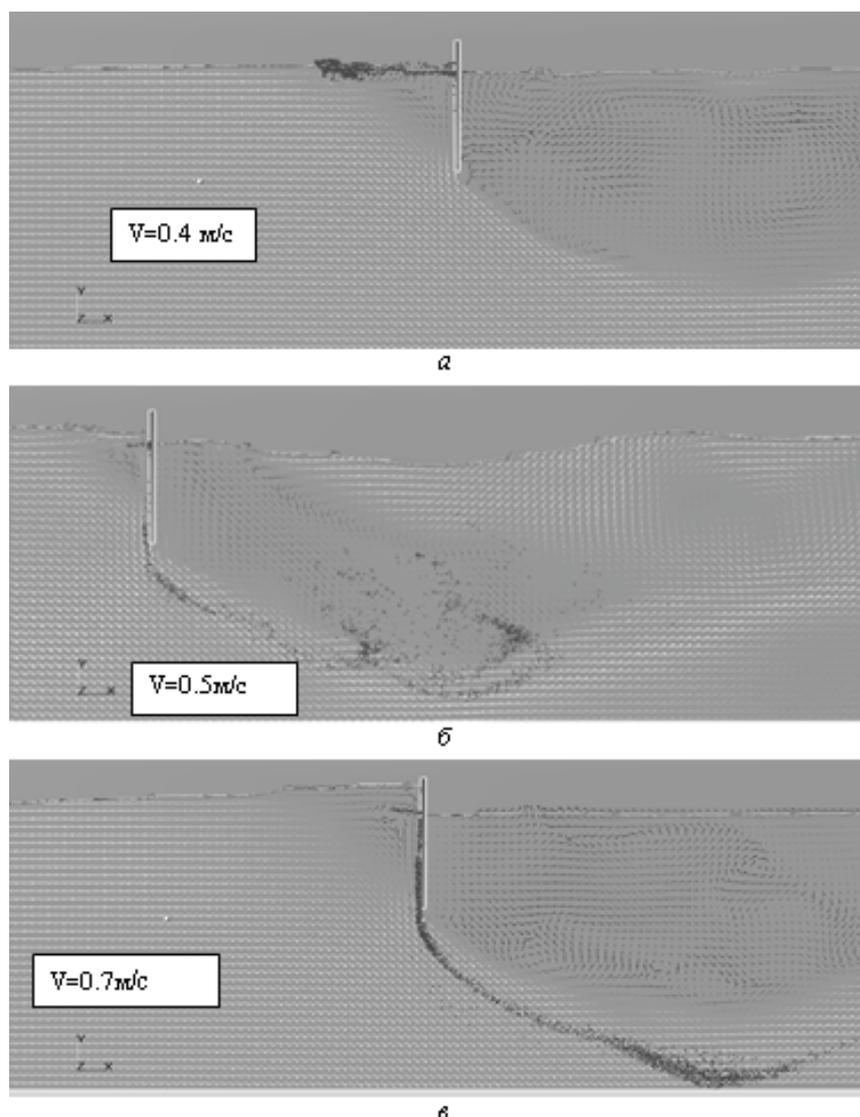


Рис. 3. Результаты численного моделирования при различных скоростях набегающего на барьер потока жидкости

Условия увлечения частиц и переноса их под барьер должны учитывать ряд довольно сложных процессов, в частности, накопление частиц перед барьером и возможность формирования «толстого», в несколько размеров частиц, слоя и особенности его формы (в том числе, образования утолщения в передней части – «головной волны», аналогично случаю сплошного слоя нефти (Amini et al., 2008)), особенности обтекания потоком отдельной частицы, находящейся у границы жидкости (при этом, вообще говоря, возникает дополнительная, направленная вниз сила из-за несимметричного обтекания частицы и понижения гидродинамического давления под ней), и др.

Не рассматривая пока эти процессы, дадим упрощенное описание процесса увлечения, основываясь на решении для потенциального обтекания прямого угла идеальной жидкостью (Ландау, Лифшиц, 1986) $V_x/V_z = -x/z$. Данное решение используем для оценок скоростей на вертикальных z и горизонтальных x расстояниях от верхнего края погруженной части барьера, меньших глубины L погружения. С учетом сказанного выше положим, что вертикальная координата частицы $z \sim (3\div 4)R \sim 0,45\div 0,6$ см, скорость $V_x \approx V_x/l$,

где l – участок линейного изменения скорости вблизи барьера, примем $l \sim (1/2 \div 1/3)L$, $L=10$ см. Тогда частицы должны увлекаться потоком вниз ($V_z = V_z^*$), начиная со скоростей внешнего потока порядка $40 \div 80$ см/с.

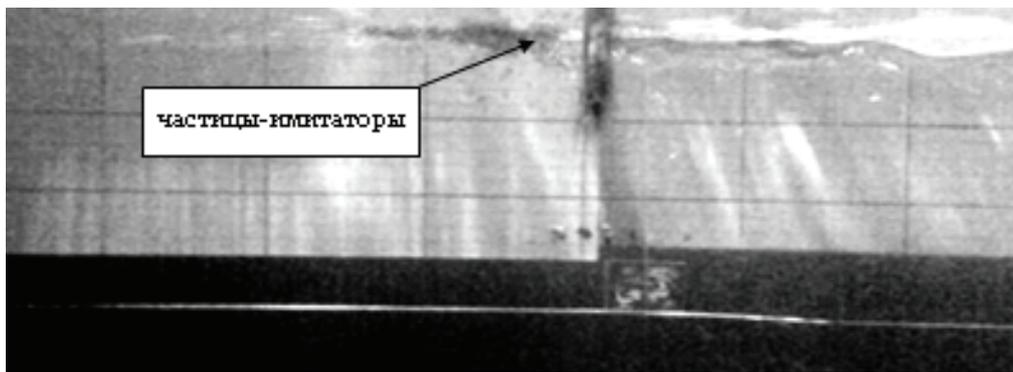
Лабораторные эксперименты

Лабораторные эксперименты проводились на базе опытового бассейна ВГАВТ. Размеры бассейна: длина – 35 м, ширина – 4 м, глубина воды – 1,2 м. В ходе экспериментов использовалась модель бонового заграждения, представлявшая собой канал шириной 0,5 м и длиной 2 м. В середине канала имеется барьер – “бонное заграждение”, погружаемый в воду на заданную глубину. В экспериментах эта глубина составляла 10 см. Модель барьера закреплялась на тележке динамометрической буксировочной системы, электропривод которой позволяет обеспечить необходимую скорость движения барьера. Компоненты скорости в толще воды измерялись с помощью акустического доплеровского velocиметра ADV (16MHz Acoustic Doppler Velocimeter), который устанавливался на буксировочной тележке. Для имитации эмульсии нефтепродуктов (ЭНП) использовались частицы из гранулированного полипропилена с плотностью около $0,85\text{--}0,95$ г/см³ и размером 2–3 мм. Частицы для лучшей визуализации были окрашены в красный цвет. Движение частиц – имитаторов ЭНП вблизи барьера фиксировалось видеокамерами, одна из которых располагалась над поверхностью воды, а вторая в подводном боксе сбоку барьера (рис. 4), движение частиц под водой фиксировалось через прозрачную стенку из оргстекла на фоне противоположной стенки барьера с масштабной разметкой.

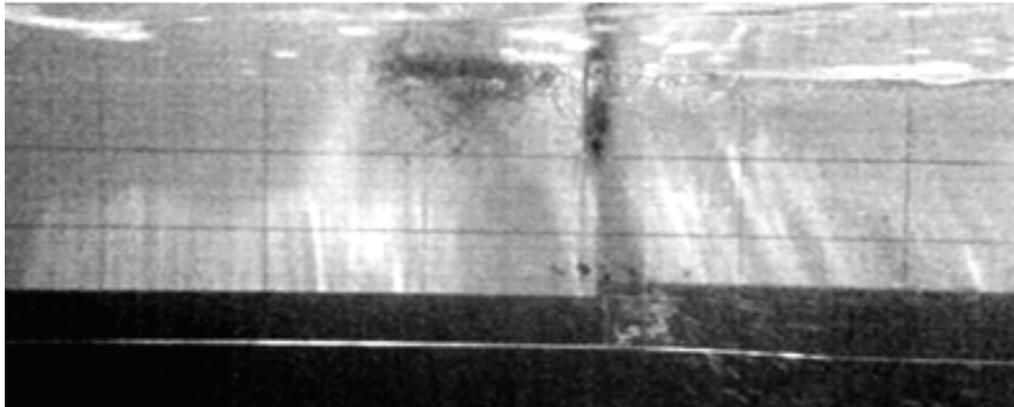


Рис. 4. Фотография лабораторной установки

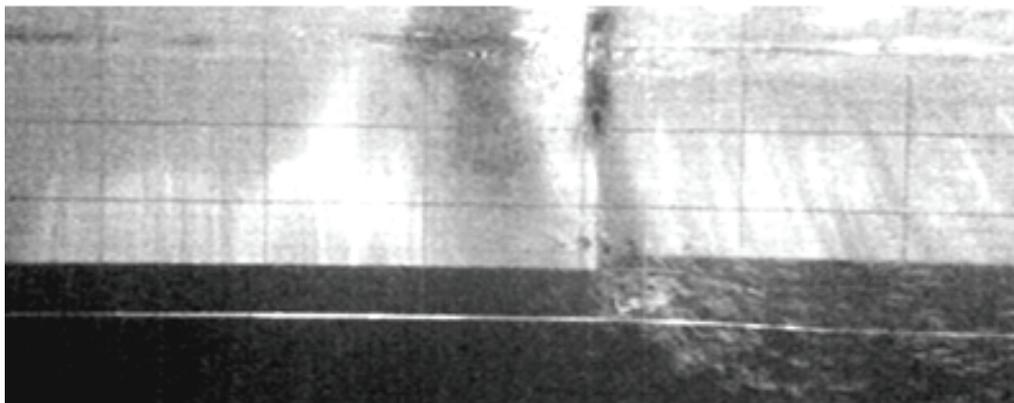
Подробное изложение количественных результатов лабораторного эксперимента планируется дать в отдельной публикации. Здесь же приведем лишь некоторые качественные результаты, иллюстрирующие движение частиц при обтекании барьера. На рис. 5 приведена серия из трех последовательных изображений, полученных в ходе подводной видеосъемки при скорости движения барьера 0,5 м/с. На верхнем кадре показано расположение частиц при их подходе



а



б



в

Рис 5. Последовательные изображения движения частиц при обтекании барьера потоком при скорости 0,5 м/с

к барьеру, на среднем и нижнем – показано, как частицы захватываются полем обтекания с поверхности и уходят под барьер. На светлом фоне частицы темные, на темном – светлые.

В качестве полученных в эксперименте результатов следует отметить наличие различных режимов динамики частиц, а именно: а) – удержания частиц барьером при небольших скоростях натекающего потока – при числах Фруда, меньших “критического” (значение последнего в экспериментах $0,4 < Fr_{cr} < 0,5$), б) – прохождения частиц при больших скоростях в условиях $Fr > Fr_{cr}$.

Отметим, что *рис. 5* относится к экспериментам, проводившимся после тщательной очистки поверхности воды от естественной органической пленки, частицы в этих условиях достигают барьера. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами численного моделирования, учитывая, что последние проводились для параметров частиц и потока, соответствующих экспериментальным условиям.

В случаях же, когда на поверхности воды присутствовала естественная «биогенная» пленка, наблюдались отличия режима движения частиц от случая чистой поверхности. Именно, частицы при обтекании барьера потоком останавливаются на некотором расстоянии от барьера, которое определяется физическими характеристиками пленки (коэффициентом поверхностного натяжения и его зависимостью от концентрации ПАВ), скоростью внешнего потока и путем, пройденным при буксировке. В условиях экспериментов это расстояние менялось от примерно 20-25 см при скорости буксировки 0,3 м/с до примерно 10 см при скорости 0,5 м/с. Частицы при этом «запирались» в области перехода от «чистой» воды к пленке, т.е. не доходили до барьера. Важным результатом явилось то, что эффективность переноса частиц за барьер в присутствии пленки заметно снижалась.

Эффективность переноса частиц за барьер можно охарактеризовать «коэффициентом прохождения» – относительным количеством прошедших частиц на заданном отрезке времени или временем полного переноса частиц (*рис. 6*).

Следует подчеркнуть, что влияние фоновой пленки на динамику частиц имитатора ЭНП исследовалось при малом количестве частиц, покрывавших в один слой лишь часть поверхности перед барьером. Динамика частиц в таком случае, как уже отмечено выше, может отличаться от случая большого количества частиц, образующих сплошной слой и, возможно, многослойную структуру перед барьером.

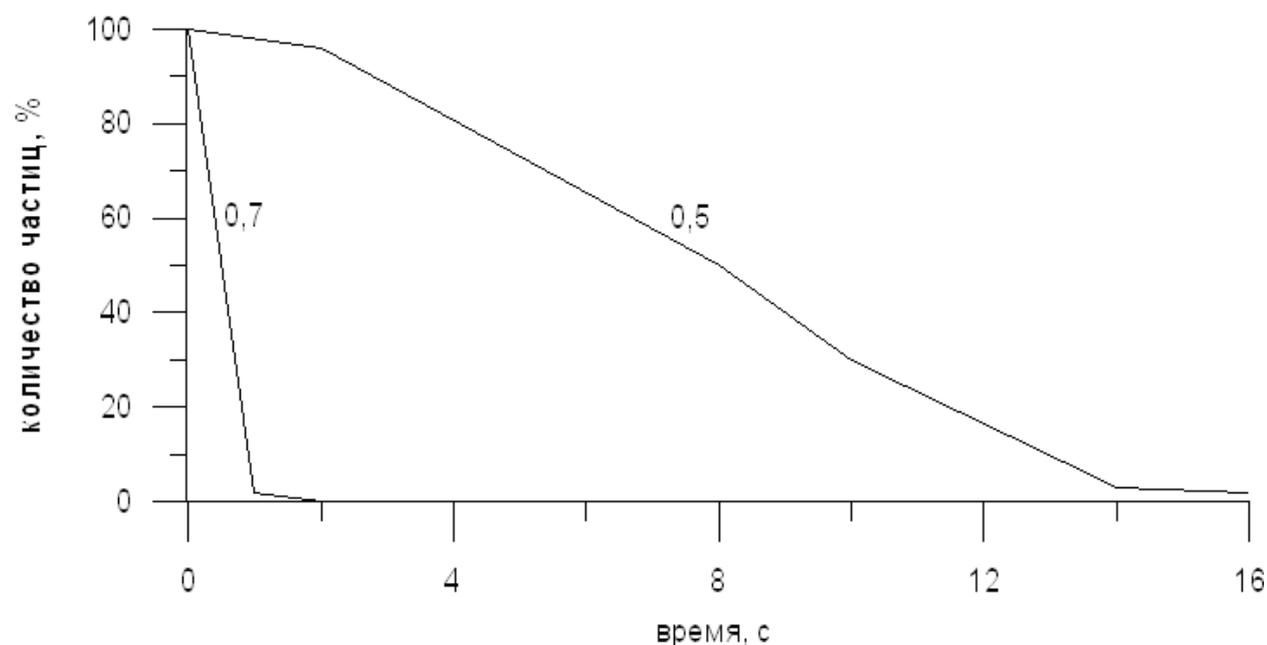


Рис. 6. Относительное число частиц - имитаторов ЭНП, оставшихся перед барьером при двух скоростях потока 0,7 и 0,5 м/с

Натурные эксперименты

Натурные исследования по проблеме удержания нефтяной эмульсии боновыми заграждениями были проведены в ходе модельных экспериментов в Нижегородской области на р. Узола. На *рис. 7* приведена фотография экспериментальной установки, аналогичной той, что использовалась в лабораторных условиях. Канал из оргстекла (шириной 0,5 м, длина 2 м) устанавливался на стойках, закрепленных в дне реки. Глубина реки в месте проведения экспериментов составляла $0,5 \div 0,6$ м. Барьер – «бонное заграждение», в середине канала погружался в воду на глубину 10 см. Кроме этого, вниз по течению в конце канала размещался второй барьер с осадкой 0,2 м для сбора частиц – имитаторов ЭНП. Скорость течения воды измерялась акустическим велосиметром ADV SonTek 16 MHz (в экспериментах она составила $0,4 \div 0,5$ м/с, движение частиц изучалось с помощью видеосъемки).

Приведем некоторые наиболее интересные результаты. Прежде всего отметим, что вверх по течению перед барьером, так же, как и в лабораторных экспериментах, происходит накопление естественных поверхностно-активных веществ (ПАВ) биогенной природы. Формирующаяся при этом пленка ПАВ по истечении достаточного времени (более 0,5 час) является практически стационарной – это отличает условия натурных наблюдений от лабораторных экспериментов. Коэффициент поверхностного натяжения σ в области стационарной пленки уменьшается линейно по мере приближения к барьеру



Рис. 7. Фотография установки для исследования эффективности локализации нефтяных загрязнений боновыми заграждениями



Рис. 8. Эффект удержания частиц пленкой ПАВ, образующейся на течении перед барьером. Стрелка указывает направление течения, скорость течения $0,4 \div 0,5$ м/с

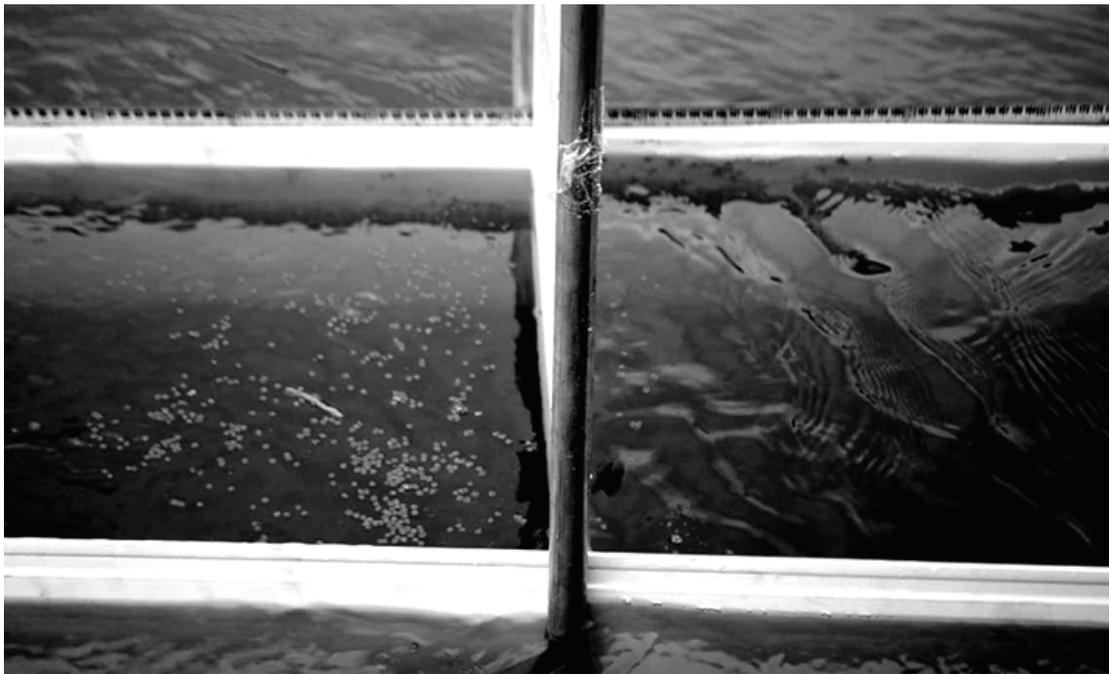


Рис. 9. Перенос частиц за барьер после прохождения гравитационной волны. скорость течения $0,4 \div 0,5$ м/с

(Mockros, Krone, 1968; Гушин, Ермаков, 2004), под пленкой при этом формируется вязкий пограничный слой, скорость течения u в котором изменяется от величины скорости внешнего потока на нижней границе слоя до нуля на поверхности воды. Согласно (Mockros, Krone, 1968; Dysthe, 2006) длина области L_f , занятой стационарной пленкой

перед препятствием, определяется выражением $L_f \approx 6.2 \cdot 10^2 \Delta\sigma / \rho V^2$, где ρ – плотность воды, $\Delta\sigma$ – перепад коэффициента поверхностного натяжения на масштабе пленки, V – скорость потока. Полагая в качестве типичных значений $\Delta\sigma \sim 30 \div 40$ мН/м, получим при $V \sim 40 \div 50$ см/с, что масштаб пленки составляет величины порядка $7 \div 15$ см, что неплохо согласуется с наблюдениями: именно на таких расстояниях частицы останавливались перед барьером (*рис. 8*), отметим, что сравнимые значения длины пленки получены и в лабораторном эксперименте (см. выше). Пленка останавливает частицы на некотором удалении от барьера, где вертикальные скорости обтекающего потока оказываются меньшими, чем в непосредственной близости от препятствия и поэтому не могут эффективно увлекать плавающие частицы вглубь воды. Таким образом, «фоновая» биогенная поверхностная пленка служит дополнительным фактором удержания «эмульсии» перед барьером. Тем не менее, как видно из *рис. 8*, несмотря на удерживающее действие биогенной пленки, «эмульсия» частично переносится за барьер, однако коэффициент такого переноса оказывается меньшим, чем в отсутствие пленки (в частности, после очистки поверхности воды перед барьером).

Сильное влияние на перенос частиц за барьер оказывают поверхностные волны. Возбуждение в ходе эксперимента гравитационных волн даже небольшой амплитуды (порядка 1 см при длине волн около 1 м) приводило к практически полному переносу частиц за барьер (*рис. 9*). Это, видимо, связано как с уменьшением погруженной части барьера в фазе образующейся перед барьером стоячей волны, так и (возможно, в большей степени) с влиянием вертикальной орбитальной скорости в стоячей волне, которая максимальна у барьера и которая, складываясь с вертикальной составляющей скорости обтекающегося потока, увеличивает коэффициент переноса за барьер. Действительно, вертикальные орбитальные скорости в стоячей волне по оценкам для условий эксперимента составляли около 10 см/с, что сравнимо с вертикальными компонентами скорости, необходимыми для увлечения частиц под барьер.

Заключение

– С использованием пакета программ Flow Vision выполнено численное моделирование движения капель с положительной плавучестью (нефтяной эмульсии) при обтекании водой вертикального барьера, имитирующего боновое загрязнение. Показано, что при небольших скоростях потока (числа Фруда, порядка и меньше 0,4) имеет место удержание частиц эмульсии перед загрязнением и, таким образом, возможен эффективный сбор нефтяных загрязнений при буксировке боновых загрязнений или установке их на потоке воды. При больших скоростях реализуется режим прохождения эмульсии за загрязнение, скорость прохождения тем выше, чем больше скорость потока.

– Проведены лабораторные эксперименты в опытовом бассейне ВГАВТ по моделированию динамики частиц-имитаторов нефтяной эмульсии при буксировке барьера. Показано,

что в условиях чистой поверхности воды, наблюдается эффект удержания частиц перед барьером при числах Фруда меньших 0,4 – 0,5 и перенос частиц за барьер при больших значениях Fr . В случае, когда поверхность воды покрыта пленкой ПАВ, наблюдается остановка частиц на некотором расстоянии перед барьером, которое зависит от характеристик пленки и скорости потока, скорость переноса частиц за барьер при этом уменьшается.

– Выполнены модельные натурные эксперименты по обтеканию вертикального барьера потоком с использованием частиц-имитаторов нефтяной эмульсии. Подтвержден эффект «остановки» частиц перед барьером в присутствии фоновой пленки ПАВ и, тем самым, повышения эффективности локализации нефтяных загрязнений боновыми ограждениями. Показано, что поверхностные волны, распространяющиеся к барьеру, приводят к интенсификации процесса переноса нефтяной эмульсии за барьер.

– Выполнен физический анализ динамики частиц в потоке, обтекающем боновое ограждение, рассмотрены условия переноса эмульсии, дано качественное объяснение результатов, полученных в численных и физических экспериментах.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 13-05-97058-р_поволжье_а и 14-08-31517-мол_а).

Литература

1. *Гущин Л.А., Ермаков С.А.* Лабораторное исследование перераспределения поверхностно-активных веществ в поле течений, индуцированных поверхностной волной // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2004, том 40, №2, С. 277-282.
2. *Ермаков С.А., Сергиевская И.А., Гущин Л.А.* Затухание гравитационно-капиллярных волн в присутствии нефтяной пленки по данным лабораторных и численных экспериментов // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. №4, С. 565 – 572.
3. *Ермаков С.А.* Влияние пленок на динамику гравитационно-капиллярных волн. Н. Новгород. ИПФ РАН. 2010. 165 с.
4. *Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Митягина М.И., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А.* Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН, 2011. 470 с.
5. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.
6. *Чебан Е.Ю., Смирнова М.Л.* Особенности использования различных модулей программного комплекса FlowVision при моделировании обтекания технических средств локализации и ликвидации разливов нефти // Труды Всероссийской научно-практической конференции «Инженерные системы 2009», серия «Прикладные исследования в механике» Т1. - М.: Изд. МФТИ, 2009. С. 81 – 86.
7. *Чебан Е.Ю.* Обоснование параметров численного моделирования обтекания бонового ограждения // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2012. № 4. С. 141-148.
8. *Amini A., Bollaert E., Boillat J.-L., Schleis A. J.* Dynamics of low-viscosity oils retained by rigid and flexible barriers // Ocean Engineering. 2008. Vol. 35. P. 1479–1491.
9. *Gong K., Tkalich P., Xu H.* The Numerical Investigation on Oil Slick Behavior behind the Oil Boom // Journal of Environmental Protection. 2014. Vol. 5. P. 739-744.
10. *Leibovich S.* Oil Slick Instability and the Entrainment Failure of Oil Containment Booms // Journal of Fluids Engineering. 1976. Vol. 98. P. 98-103.
11. *Tkalich P., Chan E.S.* Vertical mixing of oil droplets by breaking waves // Marine Pollution Bulletin. 2002. Vol. 44. P. 1219-1229.
12. *Lee C.M., Kang K.H.* Prediction of Oil Boom Performance in Currents and Waves // Spill Science & Technology Bulletin. 1997. Vol. 4. P. 257-266.
13. *Mockros L.F., Krone R.B.* Hydrodynamic effects on an Interfacial Films // Science. 1968. Vol. 161. P. 361-363.
14. *Dysthe K.B.* On surface renewal and sea slicks in Marine surface films. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. P. 65-74.

Theoretical and experimental study of an effect of oil transfer behind booms

S.A. Ermakov^{1,2}, I.A. Kapustin¹, A.A. Molkov¹, E.M. Sirotkin², E.Yu. Cheban²

¹ Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod 603950, Russia

E-mails: stas.ermakov@hydro.appl.sci-nnov.ru, kia@hydro.appl.sci-nnov.ru

² Volga State Academy of Water Transport, Nizhny Novgorod 603950, Russia

According to airborne observations of ocean surface, attempts to contain and recover oil spills using booms may result in partial transmission of oil behind fencing. Results of theoretical and experimental studies of an effect of oil emulsion transfer behind booms are presented. Numerical simulation of the motion of particles of the emulsion in the flow field of near a barrier (booms) is performed. Laboratory and field experiments using special particles, simulating oil emulsion are carried out, and good agreement between numerical results and experiment is obtained. Different regimes of the dynamics of particles were observed, exactly: barrier particle retention at low speeds of the flow - with Froude numbers less than «critical»; the passage of particles at high speeds corresponding to the Froude number excess of the critical level. An important role of a natural (biogenic) film, accumulating in front of the barrier flowing around by a flow is demonstrated. It is shown that the film results in retention of the emulsion on the water surface and in reduction of the particle transfer behind the barrier. Enhancement of the particle transfer behind the barrier due to surface waves is revealed. Physical analysis of particle dynamics in the flow and conditions of emulsion transfer behind a barrier is given, and qualitative explanation of the results of numerical and physical experiments is presented.

Keywords: oil emulsion, booms, currents, surfactant films, surface waves

References

1. Gushchin L.A., Ermakov S.A. Laboratornoe issledovanie pereraspredeleniya poverkhnostno-aktivnykh veshchestv v pole techenii, indutsirovannykh poverkhnostnoi volnoi (Laboratory investigation of surfactants redistribution due to flow field related to surface wave), *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana*, 2004, Vol. 40, No. 2, pp. 277-282.
2. Ermakov S.A., Sergievskaya I.A., Gushchin L.A. Zatokhanie gravitatsionno-kapillyarnykh voln v prisutstvii neftyanoi plenki po dannym laboratornykh i chislennykh eksperimentov (Damping of gravity-capillary waves due to oil film according to laboratory experiments and numerous simulation), *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana*, 2012, No. 4, pp. 565 – 572.
3. Ermakov S.A. Vliyanie plenok na dinamiku gravitatsionno-kapillyarnykh voln (Impact of surfactants on the dynamics of gravity-capillary waves), N. Novgorod, IPF RAN, 2010, 165 p.
4. Lavrova O.Yu., Kostyanoi A.G., Lebedev S.A., Mityagina M.I., Ginzburg A.I., Sheremet N.A. *Kompleksnyi sputnikovyi monitoring morei Rossii* (Complex satellite monitoring of Russian seas), Moscow: IKI RAN, 2011, 470 p.
5. Landau L.D., Lifshits E.M. *Gidrodinamika* (Hydrodynamics), Moscow: Nauka, 1986, 736 p.
6. Cheban E.Yu., Smirnova M.L. Osobennosti ispol'zovaniya razlichnykh modulei programmogo kompleksa FlowVision pri modelirovani obtekaniya tekhnicheskikh sredstv lokalizatsii i likvidatsii razlivov nefiti (Features of modeling processes of wrapping technical devices for localization and liquidation oil spills using apparatus of FlowVision), *Trudy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Inzhenernye sistemy 2009», seriya «Prikladnye issledovaniya v mekhanike»* (All-Russia applied scientific conference “Engineering systems 2009”, series “Applied investigations in mechanics”) Moscow: Izd. MFTI, 2009, Vol. 1, pp. 81 – 86.
7. Cheban E.Yu. Obosnovanie parametrov chislennogo modelirovaniya obtekaniya bonovogo ograzhdeniya (Justification of numerous simulation parameters for modeling fluid wrapping of booms), *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova*, 2012, No. 4, pp. 141-148.
8. Amini A., Bollaert E., Boillat J.-L., Schleis A. J. Dynamics of low-viscosity oils retained by rigid and flexible barriers, *Ocean Engineering*, 2008, Vol. 35, pp. 1479–1491.
9. Gong K., Tkalich P., Xu H. The Numerical Investigation on Oil Slick Behavior behind the Oil Boom, *Journal of Environmental Protection*, 2014, Vol. 5, pp. 739-744.
10. Leibovich S. Oil Slick Instability and the Entrainment Failure of Oil Containment Booms, *Journal of Fluids Engineering*, 1976, Vol. 98, pp. 98-103.
11. Tkalich P., Chan E.S. Vertical mixing of oil droplets by breaking waves, *Marine Pollution Bulletin*, 2002, Vol. 44, pp. 1219-1229.
12. Lee C.M., Kang K.H. Prediction of Oil Boom Performance in Currents and Waves, *Spill Science & Technology Bulletin*, 1997, Vol. 4, pp. 257-266.
13. Mockros L.F., Krone R.B. Hydrodynamic effects on an Interfacial Films, *Science*, 1968, Vol. 161, pp. 361-363.
14. Dysthe K.B. *On surface renewal and sea slicks in Marine surface films*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006, pp. 65-74.