

УДК 532.5

© Е. Ю. Чебан¹, И. А. Капустин^{2,1}, А. А. Мольков^{2,1}, М. В. Игонина¹

¹Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород

²Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород
egor.cheban.2@gmail.com

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСТЕКАНИЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ В КИЛЬВАТЕРНЫХ СЛЕДАХ СУДОВ В СЧАЛЕ

Статья поступила в редакцию 19.10.2015 г., после доработки 05.06.2016 г.

Согласно статистическим данным наибольшее количество разливов нефти происходит при выполнении погрузо-разгрузочных операций, что вызывает необходимость выполнения мер по предупреждению перерастания небольших разливов в чрезвычайную ситуацию. В этом случае целесообразно заранее создать такие условия, которые бы приводили к однозначно прогнозируемому распространению нефти в области с заранее известными гидродинамическими условиями, для которых может быть предусмотрено специальное оборудование, характеристики которого исключают унос нефти. В работе представлены результаты экспериментального исследования полей скоростей, возникающие при обтекании судов в счале в зависимости от формы корпуса судов, расстояния между ними и относительного смещения корпусов судов. Смоделировано движение имитаторов нефтепродукта на поверхности воды за корпусами счаленных судов. Произведено сопоставление результатов измерений скорости потока и видеозаписей движения пленки в кильватерном следе. Получено, что для моделей судов без обводов характер сонаправленного с движением судна потока жидкости существенно зависит от расстояния между моделями. В частности, увеличение расстояния между моделями может приводить к значительному увеличению скорости спутного течения в раннем следе за счаленными корпусами судов. Пятно загрязняющего нефтепродукта, двигаясь по направлению спутного следа, может быть задержано в некотором заранее предусмотренном месте с помощью специального оборудования с заранее определенными параметрами и конструкцией. При этом при относительном продольном смещении корпусов такой картины на ранних возрастах следов не наблюдается. Полученные предварительные результаты позволяют предположить существование некоего «оптимального» с точки зрения локализации и ликвидации разливов нефти расстояния между корпусами в счале, которое в дальнейшем может изменить подход к технологиям локализации и ликвидации разливов нефти на рейдах рек при выполнении грузовых операций с нефтью и нефтепродуктами.

Ключевые слова: разлив нефти, пленки нефтепродуктов, моделирование, поле скорости, кильватерный след.

E. Yu. Cheban¹, I. A. Kapustin^{2,1}, A. A. Molkov^{2,1}, M. V. Igonina¹

¹Volga state university of water transport, Nizhny Novgorod, Russia

²Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod, Russia

EXPERIMENTAL MODELING OF OIL SPILL SPREADING IN VESSEL'S WAKE CURRENT FROM «SHIP TO SHIP» MOORING

Received 19.10.2015, in final from 05.06.2016.

According to a statistical data the largest number of oil spill occurs in the oil handling operations. It requires special measures for preventing emergency situations from the small amount of oil spill. In this case it's necessary to create conditions for predicted oil slick spreading in the predefined place with favorable environment for oil spill response operation. The special equipment with required parameters for these places needs to be predefined too. An experimental study of an effect of oil simulator transfer from «ship to ship mooring» is given. Different parameters of «ship to ship mooring» were observed, exactly: distance between vessels, flow velocities, displacements of vessels relative to each other. Magnitudes of lateral velocities component are defined for different combinations of flow velocities, hull forms, distance between vessels and vessels' displacement are defined. Analysis of the «ship to ship mooring» flow fields is given. An important role of a vessel's mutual disposition, which changes the oil slick flow direction, is demonstrated. An increase of distance between vessels increases the velocity in wake current. Besides that a superposition velocity fields and oil simulator transfer showed a good agreement. Preliminary results allow suggest that there is the optimal distance between

Ссылка для цитирования: Чебан Е. Ю., Капустин И. А., Мольков А. А., Игонина М. В. Экспериментальное исследование растекания нефтепродуктов в кильватерных следах судов в счале // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2016. Т. 9, № 3. С. 57—66.

For citation: Cheban E. Yu., Kapustin I. A., Molkov A. A., Igonina M. V. Experimental modeling of oil spill spreading in vessel's wake current from «ship to ship» mooring. *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*. 2016, 9, 3, 57—66.

vessels in «ship to ship mooring». It can change oil spill response technologies for rivers raids at vessel's oil handling operations. The second study of this investigation will be field experiments on real vessels and numerical simulation.

Key words: oil spill, oil films, test tank, experimental modeling, velocity fields.

Разливы нефтепродуктов на внутренних водных путях (ВВП), в силу высоких скоростей и нестационарности течений с трудом поддаются локализации и ликвидации без принятия превентивных мер, препятствующих распространению нефти от места ее разлива на основное русло реки, что приводит к возникновению чрезвычайных ситуаций (ЧС(Н)). Поэтому целью любых работ по ликвидации разливов нефтепродуктов (ЛРН) на ВВП должно быть предупреждение выхода нефтяного пятна с палубы судна и акватории предприятия на основное русло реки, т. е. перерастания разлива нефти в ЧС(Н).

Выбор той или иной технологии предупреждения ЧС(Н) должен основываться на гидродинамических особенностях потоков вблизи судов, выполняющих технологические операции с нефтью на бункеровочном рейде, акватории судостроительного или судоремонтного завода и т. д. Целесообразно заранее создать такие условия, которые бы приводили к прогнозируемому распространению нефти в области с заранее известными гидродинамическими условиями и заблаговременно предусмотреть для этого специальное оборудование, характеристики которого должны исключать унос нефти. И если для разлива на основном русле ВВП осуществить такого рода операции крайне сложно из-за нестационарности речного потока, то для судов, осуществляющих технологические операции с нефтью на ограниченной акватории, это вполне осуществимо.

Для создания благоприятных условий локализации и ликвидации разливов нефтепродуктов необходимо выполнить комплекс мер как технического, так и организационного характера, основанных на создании или учете гидродинамических особенностей потока в месте расположения судов. Можно предположить, что эффективность этих мер будет зависеть от параметров движения нефтяного пятна, которые в свою очередь определяются скоростью течения, размерами и формой корпусов судов, участвующих в технологических операциях, и т. д.

На ВВП операции по погрузке/разгрузке нефтепродуктов с судов (включая заправку/бункеровку) выполняются в соответствии со схемами, показанными на рис. 1. Перекачка нефтепродуктов производится либо на одно, либо на два судна, пришвартованные борт к борту носом против течения. Рейды могут быть расположены как на значительном расстоянии от берега, так и вблизи берега, например у причалов. В этом случае при разливе нефти, например при разрыве шлангов, нефть попадет в пространство между корпусами (корпусом и стенкой причала) и будет распространяться вниз по течению в кормовую часть корпусов в соответствии с полем скоростей воды, которое определяется формой корпуса судна, его осадкой, скоростью движения или обтекания судна [1].

Ранее при анализе проблемы загрязнения водной поверхности нефтепродуктами строились в основном модели растекания пленок по поверхности безграничной жидкости, которые развивались в целом ряде работ. Так, в частности, в работе [2] предложены три основных режима растекания: инерционный, гравитационно-вязкий и режим поверхностного натяжения. В дальнейшем, в работе [3] показано существование переходного инерционно-вязкого режима, в работе [4] в одномерном приближении в рамках уравнений мелкой воды показано, что режимы в приведенной выше классификации являются асимптотиками более сложных решений. Теоретические модели растекания пленок, а также результаты экспериментов можно также найти в [4—6] и цитируемой там литературе.

Весьма существенно изменчивость течений проявляется в области ближнего кильватерного следа от корпуса одиночного судна или нескольких судов [7]. Наличие двух и более рядом расположенных судов может существенно изменить структуру корабельного следа по сравнению с одиночным судном [8].

При этом основное внимание уделялось исследованию сил, с которыми действуют находящиеся рядом суда, или характеру потока между корпусами при относительно большом расстоянии между ними, как, например, в случае катамарана. В то же время при проведении грузовых и прочих операций с нефтепродуктами, расстояние между судами составляет величину от нескольких десятков сантиметров до нескольких метров, а сами суда могут быть различных размеров и иметь разные обводы. При обтекании расположенных рядом корпусов судов между ними могут возникать поверхностные волны, которые в поперечном к корпусам направлении должны иметь характер стоячих волн. Такие стоячие волны, согласно лабораторным экспериментам [9], индуцируют вертикальные циркуляционные течения и,

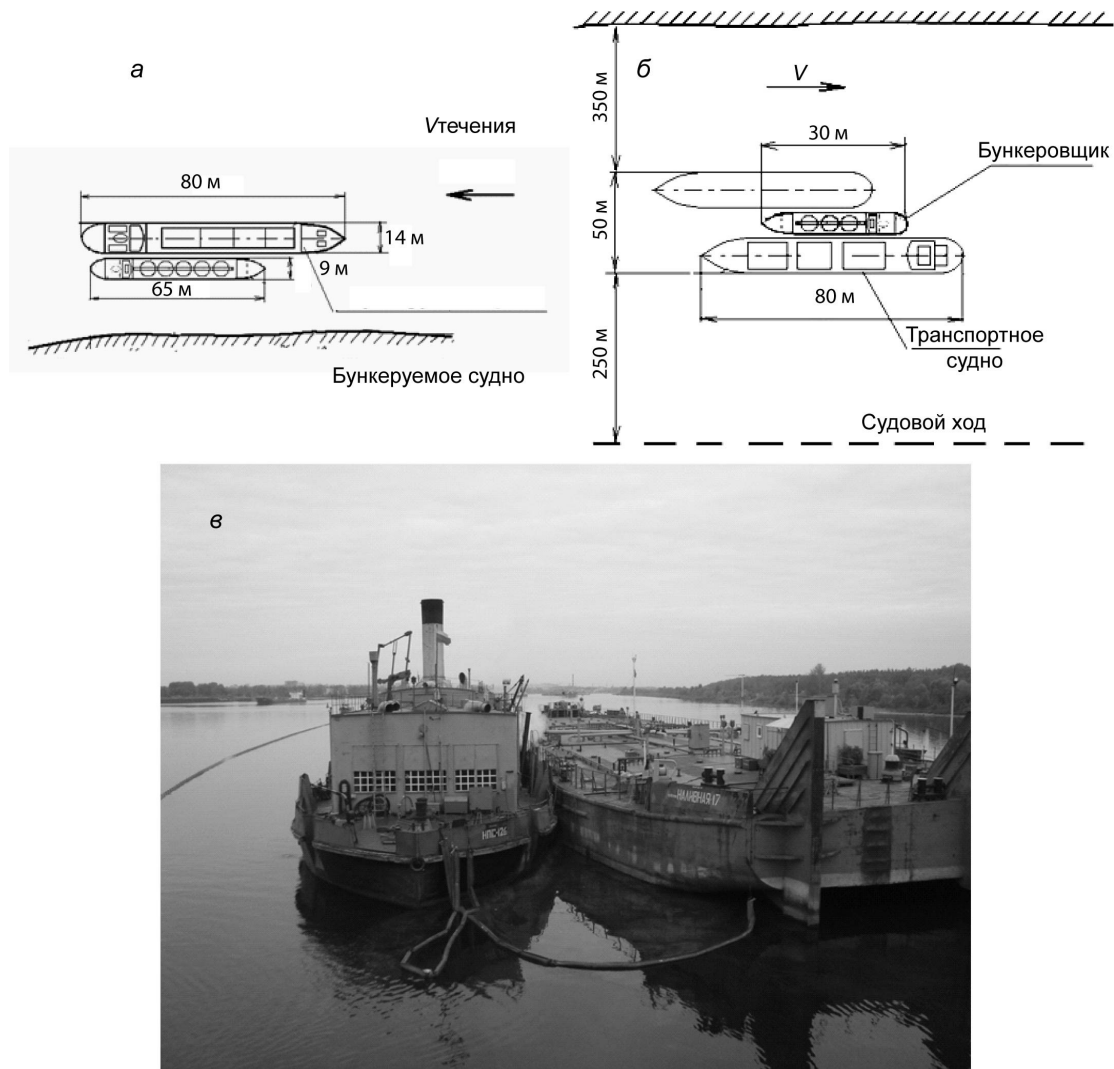


Рис. 1. Некоторые возможные варианты расположения судов при выполнении грузовых (технологических) операций с нефтепродуктами.

очевидно, могут приводить к дополнительному вертикальному переносу нефтепродуктов вглубь воды и уносу пленки под корпуса судов или оборудования ЛРН. Кроме того, при обтекании расположенных рядом корпусов возникает несимметричный кильватерный след, вызванный смещением двух потоков от корпусов разных форм и размеров [10]. При этом образуется сложная структура поля скоростей, которые также будут сильно влиять на режим перемешивания нефтяных пленок.

В настоящее время динамика нефтяных пленок в поле турбулентных и волновых движений, возникающих при обтекании расположенных рядом корпусов судов, остается слабо изученной. В то же время очевидно, что информация о механизмах распределения пленок в кильватерных следах имеет важное значение для решения инженерной задачи определения места расположения и характеристик оборудования для локализации и сбора нефтепродуктов с поверхности воды вблизи судна. Таким образом, роль целого ряда факторов, в частности, влияние неоднородных течений и поверхностного волнения, влияющих на распространение нефтепродуктов вблизи различных объектов, в том числе корпусов судов, исследованы пока недостаточно. Важность учета волн и течений в динамике нефтяных пленок связана с необходимостью решения проблемы локализации загрязнений на водной поверхности. Это вызывает необходимость исследования гидродинамических характеристик потоков, возникающих при обтекании корпусов судов в сале многофазным потоком, для разработки методик определения состава и характеристик технических средств по борьбе с разливами нефти.

Таким образом, целью данной работы является исследование переноса нефтепродуктов (пленки + эмульсии) в поле сложных волновых и турбулентных движений, возникающих при обтекании корпусов

судов, в частности, двух судов в счале для развития методов локализации и ликвидации разливов нефти при выполнении технологических операций с нефтью.

Экспериментальное исследование течений в кильватерном следе счаленных судов. Одним из способов совершенствования и создания новых средств борьбы с разливами нефти является физическое моделирование. Различные методы моделирования гидродинамики потоков при обтекании различных устройств ЛРН представлены, например, в работах [11—15]. Особо необходимо отметить исследования, выполняемые в опытовом бассейне OHMSETT (США) [16], с использованием, в том числе и натурных, образцов оборудования для ЛРН. Несмотря на сложность и дороговизну подобных исследований, а также проблемы с пересчетом результатов модельных экспериментов на натуре, они остаются единственным способом выявить физические особенности взаимодействия различных объектов со сложным многофазным потоком. Выполненные ранее исследования предполагают возможность точного моделирования поведения пролитой нефти с учетом волнения, поверхностного натяжения, сложной структуры потоков как физическими, так и численными методами [11—15].

На первом этапе была проведена серия подготовительных лабораторных экспериментов по изучению структуры следа за одиночной моделью надводного судна, буксируемой вдоль бассейна с помощью динамометрической тележки. Другой задачей этих экспериментов была разработка методики выполнения серийных экспериментов для судов в счале. Одиночное судно можно рассматривать как предельный случай счала, когда расстояние между корпусами равно нулю, т. е. отсутствует течение между корпусами и, соответственно, оно не оказывает влияния на характер потока в кормовой части счала. Это позволяет получить данные для сравнения потоков в последующем, т. е. использовать картину обтекания одиночного корпуса в качестве «точки отсчета». Поэтому целью подготовительного эксперимента было измерение структуры течений за одиночной буксируемой моделью для исследования переноса нефтепродуктов в поле сложных течений, индуцируемых корпусом судна.

Эксперименты проводились на базе бассейна Волжского государственного университета водного транспорта (ВГУВТ) (рис. 2, см. вклейку). Размеры бассейна: длина — 35 м, ширина — 4 м, глубина воды — 1.2 м. В подготовительном эксперименте использовалась хорошо обтекаемая модель судна с размерами: длина — 2 м, ширина — 0.34 м, осадка — 0.10 см.

Компоненты скорости (V_x , V_y , V_z) в толще воды измерялись с помощью акустического доплеровского измерителя скорости течения ADV (Sontek 16 MHz *Acoustic Doppler Velocimeter*). Перед буксировкой модели, для достижения требуемого при измерениях ADV отношения сигнал/шум, в воду вводились рассеивающие акустический сигнал частицы эмульсий талька и каолина, с плавучестью близкой к нейтральной. Зонд ADV погружался на различную глубину и на различном расстоянии от оси движения модели с шагом по 3 см по горизонтальной и вертикальной координатам в плоскости поперечной оси движения. Сразу же после прохождения модели через эту плоскость включалась запись ADV, длина каждой записи определялась скоростью буксировки модели и длиной бассейна. После этого модель возвращалась в исходное положение, зонд перемещался в новую точку и проводилось следующее измерение. При этом время между двумя последующими измерениями было достаточным для обеспечения стационарного состояния воды в бассейне. В результате было получено порядка 100 записей. Для удобства вместо времени введена безразмерная величина возраста следа X , равная отношению расстояния, пройденного моделью, к длине самой модели $X = V_m/L_m$. Полученные данные использовались для построения двумерных полей скорости жидкости в следе за моделью надводного судна в продольной и поперечной плоскостях по отношению к направлению движения модели.

В качестве примера на рис. 3 показано поле скоростей в плоскости поперечной оси движения модели. Поле имеет симметричный характер относительно диаметральной плоскости судна, при этом необходимо отметить особенность течения, связанную с обратным потоком жидкости в кормовой части, на что указывают вектора в этой области.

Для экспериментов со счаленными корпусами модели судов были закреплены на динамометрической буксировочной системе (ДБС), электропривод которой позволяет обеспечить необходимую скорость движения модели с высокой точностью. Датчик ADV был закреплен в кормовой части тележки на специально изготовленном координатном устройстве, которое позволяет перемещать датчик в трех направлениях. Положения следа фиксировались с помощью видеозаписи.

В результате данных экспериментов были получены фоновые поля скоростей для предельного случая счаленных моделей, расстояние между которыми равно нулю, что было необходимо для планирования/проведения дальнейших экспериментов и их анализа их результатов.

В ходе второй серии экспериментов со счаленными моделями судов использовались три модели судов с различными формами корпусов и главными размерениями: «VolgoDon» (хорошо обтекаемое, длина — 2.16 м, ширина — 0.41 м, высота борта — 0.085 м, масштаб 1:40); «Barge» (плохо обтекаемое, длина — 2.14 м, ширина — 0.33 м, высота борта — 0.12 м, масштаб 1:50); «Бункеровщик» (хорошо обтекаемое, длина — 1.39 м, ширина — 0.305 м, осадка — 0.15 м, масштаб 1:50). Измерения скорости производились в нескольких точках по ширине корпуса, где возможно изменение характера потока: по наружным бортам обоих корпусов, в диаметральной плоскости каждого корпуса, на половине ширины корпуса и точка на оси между корпусами. Во время экспериментов изменялись скорость течения, расстояние между корпусами и их относительное смещение.

На рис. 4—7 показаны результаты обработки записей ADV в виде одномерных профилей скорости для различных случаев расположения судов. Анализ двумерных полей оказался затруднительным ввиду сильного (на порядок) различия величин продольной и поперечной компонент скорости жидкости, поэтому был предложен способ обработки данных ADV, состоящий в построении серий одномерных профилей скорости в заданных сечениях измерительной сетки, и с учетом переноса компонент скорости в неподвижную систему отсчета (вычитание скорости движения системы).

Для удобства математического описания были введены безразмерные параметры, описывающие геометрию счалов. Для расстояния между корпусами необходимо ввести относительное удаление судов друг от друга, представленное в виде отношения расстояния между судами к общей ширине счаленных судов (относительное расстояние между корпусами судов в счале):

В результате данных экспериментов были получены фоновые поля скоростей для предельного случая счаленных моделей, расстояние между которыми равно нулю, что было необходимо для планирования/проведения дальнейших экспериментов и их анализа их результатов.

В ходе второй серии экспериментов со счаленными моделями судов использовались три модели судов с различными формами корпусов и главными размерениями: «VolgoDon» (хорошо обтекаемое, длина — 2.16 м, ширина — 0.41 м, высота борта — 0.085 м, масштаб 1:40); «Barge» (плохо обтекаемое, длина — 2.14 м, ширина — 0.33 м, высота борта — 0.12 м, масштаб 1:50); «Бункеровщик» (хорошо обтекаемое, длина — 1.39 м, ширина — 0.305 м, осадка — 0.15 м, масштаб 1:50). Измерения скорости производились в нескольких точках по ширине корпуса, где возможно изменение характера потока: по наружным бортам обоих корпусов, в диаметральной плоскости каждого корпуса, на половине ширины корпуса и точка на оси между корпусами. Во время экспериментов изменялись скорость течения, расстояние между корпусами и их относительное смещение.

На рис. 4—7 показаны результаты обработки записей ADV в виде одномерных профилей скорости для различных случаев расположения судов. Анализ двумерных полей оказался затруднительным ввиду сильного (на порядок) различия величин продольной и поперечной компонент скорости жидкости, поэтому был предложен способ обработки данных ADV, состоящий в построении серий одномерных профилей скорости в заданных сечениях измерительной сетки, и с учетом переноса компонент скорости в неподвижную систему отсчета (вычитание скорости движения системы).

Для удобства математического описания были введены безразмерные параметры, описывающие геометрию счалов. Для расстояния между корпусами необходимо ввести относительное удаление судов друг от друга, представленное в виде отношения расстояния между судами к общей ширине счаленных судов (относительное расстояние между корпусами судов в счале):

$$b = b_s / B_s,$$

где B_s — суммарная ширина судов в счале; b_s — расстояние между корпусами судов в счале.

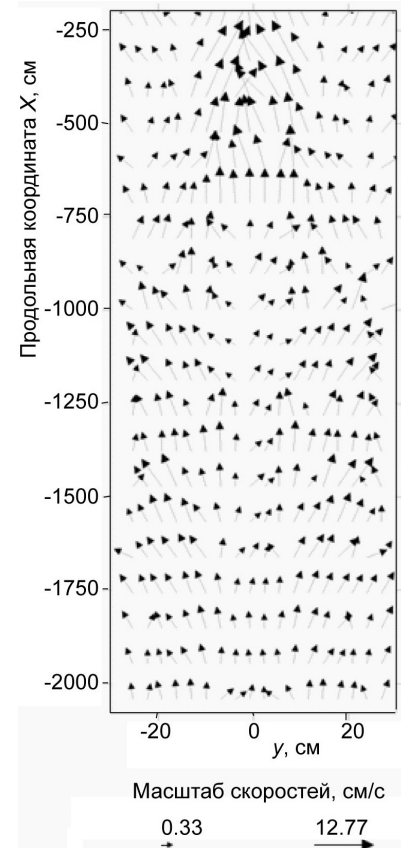


Рис. 3. Поле скоростей в горизонтальной плоскости.

Относительное удаление корпусов по длине: отношение смещения судов относительно длины всего счала.

$$l = l_{\text{смещ}} / L_s$$

Результаты измерения скорости потока в кормовой части судов в счале представлены в безразмерных координатах X/L_s и Y/B_s .

На рис. 4 показан счал корпусов с обтекаемыми обводами и расстоянием между ними $b = 0.0308$ и $b = 0.0615$ (20 и 40 мм), что соответствует натурным размерам 1 и 2 м. Корпуса выровнены по корме. Из анализа экспериментальных данных следует, что изменение продольной составляющей скорости для двух вариантов расстояний несущественно и формы профилей в спутных струях аналогичны. В то же время видно некоторое снижение продольной составляющей скорости на расстоянии в $3/4$ от ширины корпуса «бункеровщика».

На рис. 4, б для того же расположения корпусов показано изменение поперечных составляющих скорости в кильватерном следе. При сравнении случаев с разным расстоянием можно увидеть, что профили поперечных составляющих скорости изменяются существенно. Например, на оси между корпусами профиль поперечной скорости имеет максимум на расстоянии $0.1L_s$ (200 мм) от корпусов в корму и плавно убывает в направлении потока, однако при увеличении расстояния ее характер существенно меняется — поперечная скорость увеличивается от нуля до 1 см/с на значительном удалении от корпусов. Кроме того, существенно изменяется картина течения в корме корпуса «Бункеровщика», что, видимо, связано с влиянием потока около «Volgo-Don», который имеет большую ширину. В частности, если для корпуса 1 при расстоянии 20 мм поперечные скорости убывают примерно по линейному закону с увеличением расстояния, то при расстоянии 40 мм убывают уже по нелинейному (предположительно степенному), закону.

Результаты измерения позволили выделить спутные струи, возникающие в кормовых областях обеих моделей (рис. 4), ширина которых в данном случае определяется шириной корпусов моделей.

Для сочетания плохо и хорошо обтекаемых корпусов (рис. 5) в результате увеличения расстояния между ними также существенно меняется структура поля скорости. На оси между корпусами поперечная скорость потока снижается более чем в 2 раза и область максимальных значений смещается в корму. Общий вывод, который можно сделать из анализа профилей скорости, — нефтяное пятно предположительно

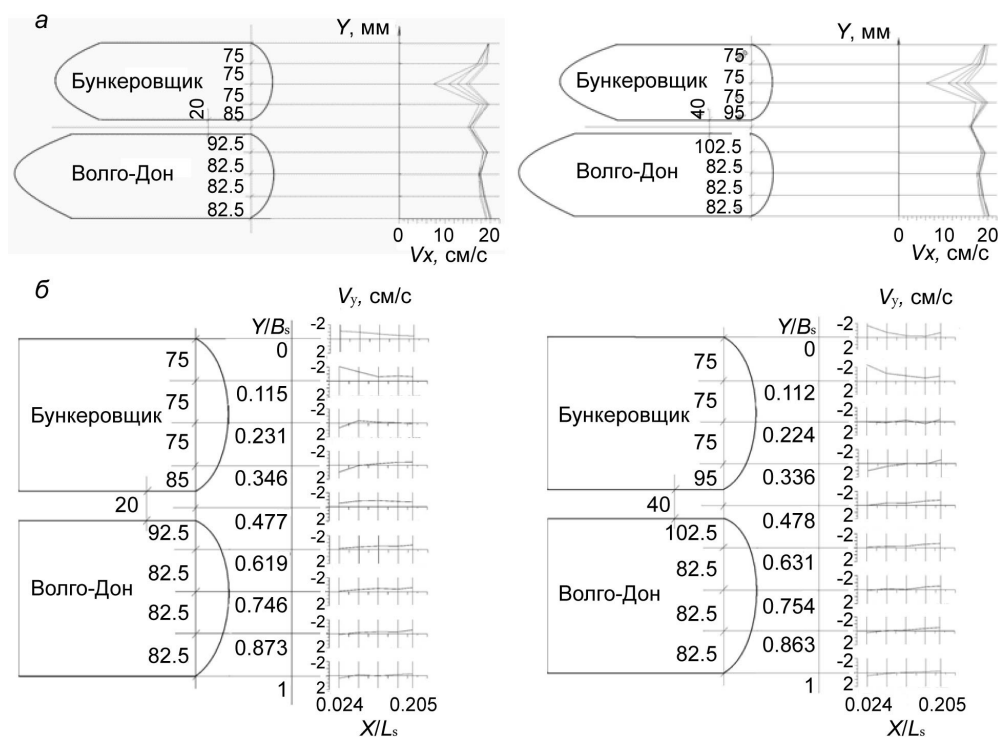


Рис. 4. Изменение продольных (а) и поперечных (б) составляющих скорости для счала из двух хорошо обтекаемых судов при различном расстоянии между корпусами судов. Слева — $b = 0.0308$; справа — $b = 0.0615$.

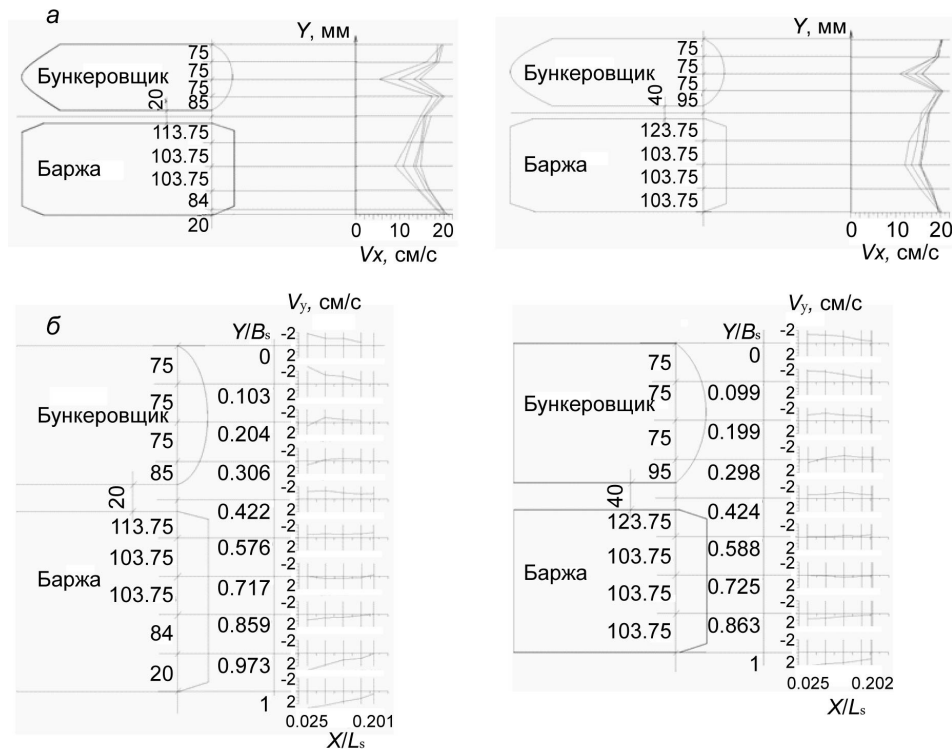


Рис. 5. Изменение продольных (а) и поперечных (б) составляющих скорости для счала из хорошо и плохо обтекаемого судов при различном расстоянии между корпусами судов. Слева — $b = 0.0265$; справа — $b = 0.053$.

будет локализоваться плохообтекаемым корпусом и удаляется от счала со скоростью $V = 6$ см/с, что приблизительно в 3.5 раза меньше скорости невозмущенного счалом потока (фоновой скорости). Нефтяное пятно может «уйти» под кормовую часть корпуса баржи, принимающей участие в грузовых операциях, что в свою очередь потребует существенного изменения расположения средств локализации и ликвидации разливов нефти относительно корпусов судов, т. е. усложнения технологии ЛРН.

Относительное смещение корпусов в продольном направлении существенно изменяет характер потока в кормовой части судов в счале (рис. 6, 7). Исходя из анализа профилей скорости, можно утверждать, что поток будет смещаться в сторону удалённого корпуса. На это указывают профили скорости на рис. 6. Причем для хорошообтекаемых корпусов у смещенного корпуса происходит изменение знака профилей скорости, чего не наблюдается, например, у сочетания плохо и хорошообтекаемого корпуса.

Для проверки выводов, сделанных на основе измерений профилей скорости, было смоделировано движение имитаторов нефтепродукта [18] (об имитации динамики пленок нефтепродуктов см. также [17, 19]) на поверхности воды за корпусами счаленных судов (рис. 8, см. вклейку). Произведено сопоставление результатов измерений скорости потока и видеозаписей движения пленки в кильватерном следе. Анализ результатов позволил получить закономерности движения пленки в следах, которые будут являться исходными данными для расчета характеристик средств локализации и ликвидации разливов нефтепродуктов в дальнейшем.

Анализ видеозаписей показал, что уменьшение расстояния между корпусами приводит к более «сильной» локализации загрязнителя в спутной струе за корпусом баржи (плохообтекаемого судна). Уменьшение скорости обтекания приводит к аналогичному результату: например, замечено, что при скоростях 0.11 м/с и расстоянии $b = 0.0265$ (20 мм или в реальных условиях скорость — 0.5 м/с, расстояние — 1.2 м), загрязнитель локализуется за кормой плохообтекаемого корпуса. Это позволяет предположить, что на участках рек (рейдах) с определенной скоростью течения и заданными характеристиками судов, участвующих в грузовых операциях, можно снизить требования к использованию средств ЛРН для предупреждения перерастания разливов нефти в чрезвычайную ситуацию.

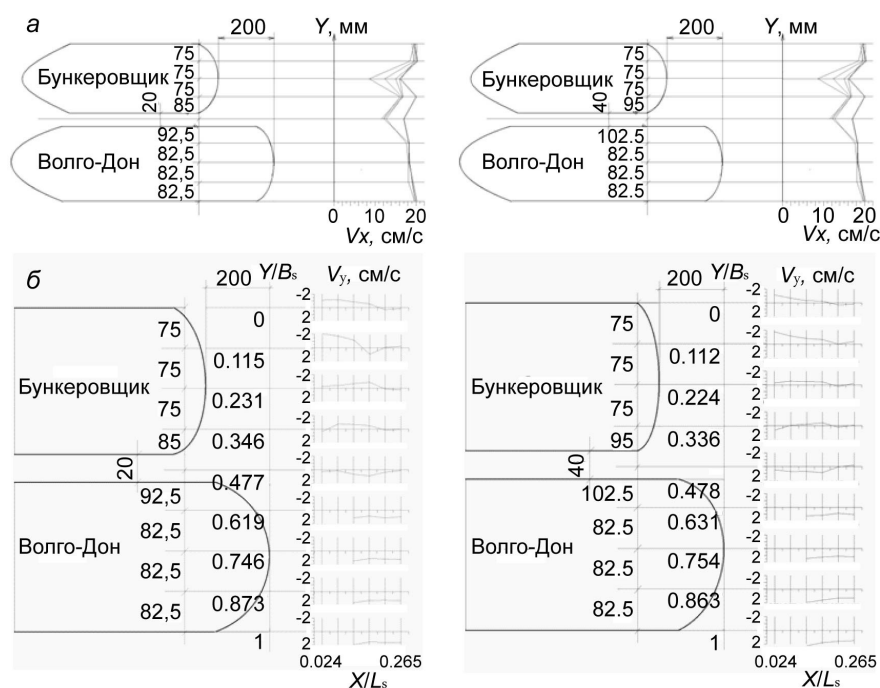


Рис. 6. Изменение продольных (а) и поперечных (б) составляющих скорости при относительном смещении корпусов вперед ($l = 0,1$). Слева — $b = 0.0308$; справа — $b = 0.0615$.

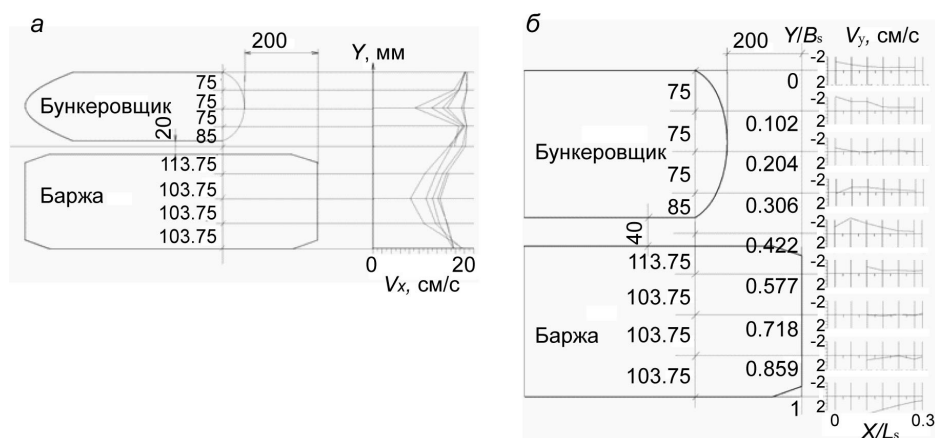


Рис. 7. Изменение продольных (а) и поперечных (б) составляющих скорости при относительном смещении плохо и хорошообтекаемого корпусов вперед ($b = 0,0265$; $l = 0,1$).

Смоделировано движение имитаторов нефтепродукта на поверхности воды за корпусами счаленных судов. Произведено сопоставление результатов измерений скорости потока и видеозаписей движения пленки в кильватерном следе. Получено, что геометрия счала (расстояния между судами, продольное смещение, форма корпуса) сильнее всего проявляется в поперечной компоненте поля обтекания. Кроме того, для моделей судов без обводов характер спутного (сонаправленного с движением судна) движения жидкости существенно зависит от расстояния между моделями. В частности, увеличение расстояния между моделями с 20 и 40 мм, что соответствует натурному расстоянию 1 и 2 м, и может приводить к значительному увеличению и скорости спутного течения в раннем следе за счаленными корпусами судов. Результаты измерений позволяют предположить, что пятно загрязняющего вещества (нефтепродукт), двигаясь по направлению спутного следа, может быть задержано в некотором заранее предусмотренном месте специальным оборудованием, параметры и конструкция которого могут быть заранее определены. Однако при относительном продольном смещении корпусов такой картины, по крайней мере на ранних возрастах следов, не наблюдается.

Анализ полей скорости позволяет считать, что изменение скорости потока и расстояния между корпусами судов в счале существенным образом влияют на локализацию нефтяного пятна в спутной струе за корпусами судов. Предполагается, что на ограниченных акваториях рек для заданных комбинаций расположения судов в счале можно будет снизить требования к использованию средств ЛРН и предотвратить перерастание разливов нефти в чрезвычайную ситуацию.

Полученные предварительные результаты позволяют предположить существование некоего «оптимального» с точки зрения локализации и ликвидации разливов нефти расстояния между корпусами в счале, которое позволит существенно изменить подход к технологиям локализации и ликвидации разливов нефти на рейдах рек при выполнении грузовых операций, для этого, однако, требуется проведение дополнительных исследований.

В дальнейшем будут выполнены натурные и численные исследования зависимости полей скорости за счаленными судами от расстояния между судами, формы корпуса и относительного смещения, будет выполнено сопоставление результатов измерений для разработки методик проектирования оборудования для локализации и ликвидации загрязнений. В том числе, будет выполнено численное моделирование растекания нефтяного пятна для судов в счале с использованием пакетов программ FlowVision, ANSYS Fluent и NUMECA FineMarine.

Авторы выражают благодарность д.ф.-м.н. С. А. Ермакову за интерес, проявленный к работе, ценные замечания и комментарии.

Работа выполняется при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № НК 14-08-31517/14 мол.а).

Литература

1. *Войткунский Я. И.* Сопротивление движению судов. Учебник. 2-е изд. доп. и перераб. Л.: Судостроение, 1988. 288 с.
2. *Fay J. A.* The spread of oil slicks on a calm sea // *Oil on the Sea* / Ed. By D. P. Hoult. Plenum New York, 1969. P. 53—63.
3. *Unni Hajime, Inone Ichiro.* Initial behavior of oil slick // *Journal Chem. Eng. Jap.* 1978. Vol. 11, N. 1. P. 13—18.
4. *Коротяев Г. К., Кровотынецов В. А.* Интегральная модель динамики нефтяного разлива // Дистанционное зондирование океана. Севастополь: МГИ АНУССР, 1982. С. 108—115.
5. *Журбас В. М.* Основные особенности распространения нефти в море // *Итоги науки и техники. Механика жидкости и газа.* М.: ВИНТИ, 1978. Т. 12. С. 144—159.
6. *Phillips W. R. C.* On the Spreading Radius of Surface Tension Driven Oil on Deep Water // *Applied Scientific Research* 57: 67—80. Kluwer Academic Publishers, 1997.
7. *Ермаков С. А., Капустин И. А.* Экспериментальное исследование расширения турбулентного следа надводного судна // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2010. Т. 46, № 4. С. 565—570.
8. *Jiankang Wu, Lee T. S., Shu C.* Numerical study of wave interaction generated by two ships moving parallelly in shallow water // *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 2001. 190. 2099—2110.
9. *Ермакова О. С., Ермаков С. А., Мальков Ю. А., Сергеев Д. А., Троицкая Ю. И.* Исследование нелинейных течений, возбуждаемых стоячими поверхностными волнами в жидкости: лабораторный эксперимент // *Изв. РАН ФАО.* 2009. Т. 45, № 6. С. 846—853.
10. Numerical study of the hydrodynamic interaction between ships in viscous and inviscid flow. José Miguel Ahumada Fonfah (PhD thesis).
11. *Комаровский Д. П., Липский В. К.* Взаимодействие нефтяного пятна на поверхности водотока с боновым ограждением // *Природные ресурсы.* 2003. № 4. С. 113—116.
12. *Lee C. M., Kang K. H., Cho N. S.* Trapping of leaked oil with tandem oil fences with Lagrangian analysis of oil droplet motion // *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering.* 1998. V. 120. P. 50—55.
13. *Lee C. M., Kang K. H.* Investigations on containment-capability and dynamic response of an oil fence in waves // *Annual Report of Advanced Fluids Engineering Research Center, AFR-93-F01.* 1994. P. 1—42.
14. *Clavelle E. J., Rowe R. D.* Numerical simulation of oilboom failure by critical accumulation // *Proc. 16th Arctic and Marine Oilspill Program Technical seminar, Calgary, June 7—9, 1993.* V. 1. P. 409—418.
15. *Чебан Е. Ю.* Использование программного комплекса «FlowVision» для разработки методики оценки эффективности нефтесборного бонового ограждения // *САПР и графика.* Москва: Изд. «КомпьютерПресс», 2007. С. 92—96.
16. OHMSETT. URL: <http://www.ohmsett.com> (Дата обращения: 10.10.2015).
17. *Ермаков С. А.* Влияние пленок на динамику гравитационно-капиллярных волн: Монография. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2010. 164 с.
18. *Ермаков С. А., Капустин И. А., Мальков А. А., Сироткин Е. М., Чебан Е. Ю.* Теоретическое и экспериментальное исследование эффекта прохождения нефтепродуктов за боновые ограждения // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2015. Т. 12, № 2. С. 127—139.
19. *Ермаков С. А., Капустин И. А., Лазарева Т. Н., Шомина О. В.* Экспериментальное исследование разрушения поверхностных пленок обрушивающимися гравитационными волнами. предварительные результаты // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2015. Т. 12, № 1. С. 72—79.

К статье Чебан Е. Ю. и др. Экспериментальное исследование...



Рис. 2. Схема экспериментальной установки в опытном бассейне ВГУВТ.

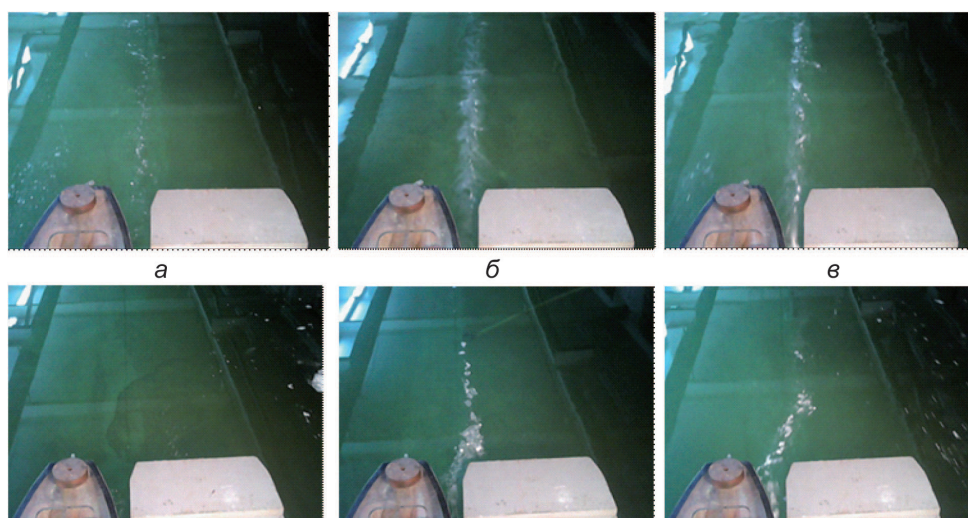


Рис. 8. Динамика имитатора загрязнителя при изменении скорости течения и расстояния между корпусами. Вверху – расстояние 40 мм, внизу – 20 мм; а – скорость течения 0.11 м/с; б – 0.22 м/с; в – 0.33 м/с.