



Использование программного комплекса FlowVision для разработки методики оценки эффективности нефтесборного бонового ограждения

Егор Чебан

Учитывая, что количество разливов нефти с судов различных типов не уменьшается, проблема проектирования эффективных средств их локализации и ликвидации остается актуальной, особенно на реках с высокими скоростями течений.

Для локализации и ликвидации разливов нефти (ЛРН) используются боновые ограждения (рис. 1), к конструкции которых предъявляются жесткие требования по максимальной удерживающей способности на течения и волнения, по прочности, минимальной массе и погрузочному объему, а также по максимальному использованию судового оборудования. Основными характеристиками боновых ограждений являются надводный борт, осадка, высота юбки, диаметр камеры плавучести, масса (см. рис. 1).

Используемые в настоящее время на судах боновые ограждения обладают целым рядом существенных недостатков — они не учитывают массу разлива, особенности судов, условия плавания и технологию проведения операций ЛРН в судовых условиях. Проблема проектирования эффективных технических средств локализации усложняется еще и отсутствием конкретных требований к их характеристикам, в частности не установлены требования к высоте надводного борта и осадке боновых ограждений, которые должны обеспечивать предотвращение уноса нефти за боновое ограждение при различных скоростях течения, что является основной проблемой при их эксплуатации. Унос нефти под бон

объясняется сложными гидродинамическими процессами, происходящими в зоне раздела сред нефть — вода, обладающих различными физическими свойствами (плотность, вязкость, поверхностное натяжение).

В настоящее время описаны три модели уноса нефти под бон: капельный сквозной просок, или унос; дренажный просок и критическое накопление (рис. 2). Исследованию уноса нефти посвящено большое количество работ, в которых показано, что критическая скорость, при которой возникает унос нефти, составляет 0,5 м/с.

Решить проблему уноса нефти можно путем одновременного с локализацией удаления нефти с поверхности воды с определенной скоростью, соответствующей условиям в районе разлива, что возможно реализовать с помощью комбинированных устройств, состоящих из бонового ограждения и нефтесборного устройства (комплекс «ПБО-НСУ») — рис. 3. С этой целью ВГАВТом было предложено производить предварительное ограживание бонами судов, выполняющих технологические операции с нефтью и нефтепродуктами, с использованием комплекса «ПБО-НСУ».

Для этого необходимо создать две математические модели работы ПБО: во-первых,

Егор Юрьевич Чебан

Канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры «Теория корабля и экология судоходства» ФГОУ ВПО «Волжская государственная академия водного транспорта».

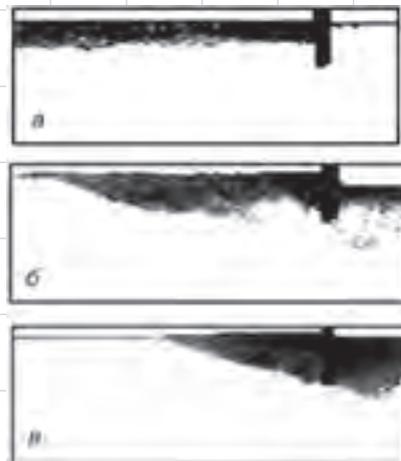


Рис. 2. Взаимодействие нефтяного пятна с боновым ограждением: а — локализация без уноса; б — сквозной просок; в — дренажный просок

с учетом скорости течения, массы разлива, свойств нефтепродуктов и условий эксплуатации судна, а во-вторых — с учетом производительности нефтесборного устройства и условий эксплуатации судна. Наличие таких моделей позволит на этапе проектирования определить параметры бонового ограждения, обеспечивающие отсутствие уноса нефти под ПБО.

Одной из проблем при изучении взаимодействия нефтяного пятна с комплексом «ПБО-НСУ» является выбор методов исследования. Как правило, для этого используются экспериментальные бассейны, лотки и т.п. Боновое ограждение в этом случае заменяется неподвижной плоской стенкой. Однако эти методы обладают рядом существенных недостатков: во-первых, трудно получить достоверную информацию об обтекании, а во-вторых, тре-

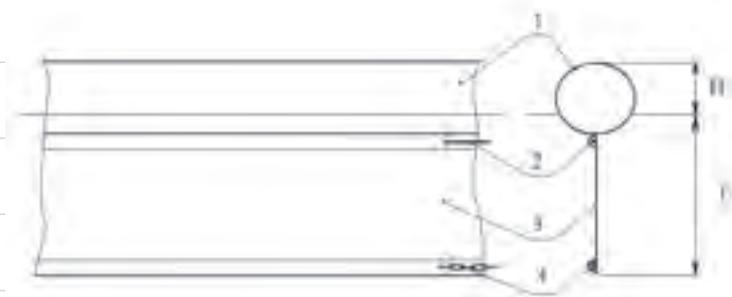


Рис. 1. Схема бонового ограждения: 1 — камера плавучести; 2 — трос; 3 — юбка; 4 — цепь; H — высота надводного борта; T — осадка бонового ограждения

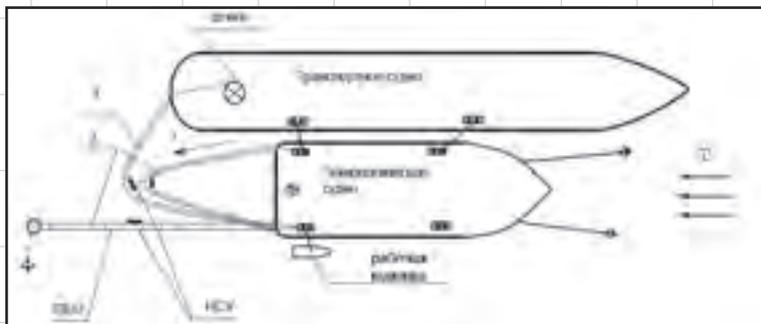


Рис. 3. Принципиальная схема применения комплекса «ПБО-НСУ»: 1 — направление распространения нефти; 2 — варианты положения комплекса до выполнения технологических операций; 3 — расположение комплекса во время выполнения технологических операций

буются значительные экономические затраты, поскольку взаимодействие нефтяного пятна с боновым ограждением представляет собой совокупность сложных гидродинамических процессов, для исследования которых только модельных экспериментов недостаточно. Как и во многих подобных случаях, здесь наиболее рациональным методом является математическое моделирование, позволяющее реализовать идею «виртуального испытательного стенда». В основе программ, предназначенных для такого моделирования, лежат численные методы решения неупрощенных дифференциальных уравнений движения вязкой жидкости. Для этих целей нами была использована программа FlowVision, разработанная инженеринговой компанией «ТЕСИС».

Выбор программы для моделирования движения жидкости — весьма непростая задача, поскольку на рынке представлено значительное количество подобного ПО. Одним из основных требований при выборе программы являлось качественное совпадение с результатами, полученными как экспериментальным путем, так и моделированием с помощью аналогичных гидродинамических пакетов.

При апробации FlowVision решались следующие задачи:

- получение циркуляционного течения внутри нефтяного пятна во фронтальной зоне бонового ограждения, которое препятствует уносу нефти под бон;
- появление уноса нефти под бон;
- определение возможности удаления нефти с поверхности воды с помощью отрицательного источника или стока.

Немаловажным фактором при выборе являлся также простой и доступный интерфейс программы, русскоязычная техническая поддержка.

На первом этапе для решения вышеописанных задач использовалась демо-версия FlowVision с ограничением числа ячеек. С ее помощью поставленные задачи были решены в двумерной постановке. Свободная поверхность заменялась граничным условием «Стенка с проскальзыванием», то есть отсутствова-

ли нормальные составляющие скоростей, что незначительно противоречит действительной картине обтекания, поскольку боновые ограждения, как правило, представляют собой протяженные конструкции, у которых длина значительно превосходит осадку.

Для решения этих задач использовалась модель «Несжимаемая жидкость» и нефть моделировалась заданием решения уравнения для переменной «Концентрация». При моделировании учитывалось, что FlowVision позволяет рассчитывать для несмешивающихся жидкостей объемную концентрацию.

Исходными данными для первоначальной апробации служили скорость течения и осадка бонового ограждения. В качестве результатов экспериментов использовалась визуализация структуры потока в виде векторов скорости (векторных полей) и изолиний концентра-

ции нефти, определялось появление ситуаций а и б, показанных на рис. 4.

Полученные векторные поля и изолинии концентраций нефти качественно сравнивались с результатами, ранее полученными Chang-Fa An (CFD Analysis Helps Develop Up to 4X Faster Oil Containment Boom Fluent software users. 2001) с помощью программного комплекса Fluent 4.32 при скорости 0,3 м/с и осадке 1 м. Сравнение показало, что формы пятен в обоих случаях совпадают — на это указывает положение изолиний. В обоих случаях векторы скорости внутри пятна направлены в сторону, противоположную скорости течения, что свидетельствует о возникновении циркуляционного течения. Кроме того, полученные результаты сравнивались с теоретическими и экспериментальными исследованиями. Следовательно, результаты, полученные с помощью FlowVision, не противоречат ранее выполненным исследованиям, а значит, программа FlowVision может быть использована для изучения процессов, возникающих при взаимодействии бонового ограждения в виде плоской стенки с двухфазным потоком.

При всей своей простоте и надежности решение задачи обтекания бонового ограждения с использованием модели «Несжимаемая жидкость» без учета свободной поверхности уже не отвечает современным требованиям к проектированию как боновых ограждений, так и нефтесборных устройств. Это объясняется тем, что характер работы подобных конструкций связан с изменением их положения на поверхности воды, по которой течет нефть. Учет свободной поверхности по-

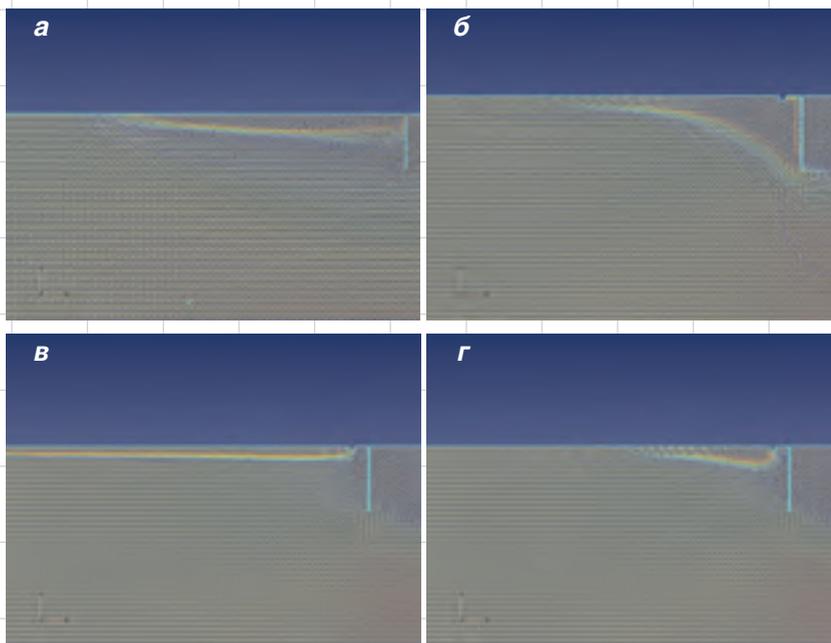


Рис. 4. Визуализация поля течений и изолинии концентрации: а — возникновение циркуляционного течения в пятне; б — унос нефти под бон; в, г — удаление нефти с поверхности воды



звояет более точно определять параметры средств локализации и ликвидации разливов нефти. Такая задача была решена в ходе наших исследований с помощью программного комплекса FlowVision.

На основе этой программы был создан виртуальный испытательный стенд, который представлял собой систему, состоящую из математической модели движения жидкости, расчетной области, граничных условий и сетки. Такой стенд позволяет при задании ряда параметров комплекса «ПБО-НСУ» (конструкции, производительности и т.п.) и при известных величинах, характеризующих движение двухфазной жидкости, получать недостающие параметры (размеры) исследуемого комплекса и картину его обтекания.

Для создания стенда была разработана расчетная область (рис. 5) с использованием программного комплекса SolidWorks и обеспечен ее импорт в FlowVision.

После импорта геометрии, на этапе задания математической модели, в список решаемых уравнений были добавлены уравнения для переменной «Концентрация». Нефть задавалась граничным условием на грани Г1 (см. рис. 5) расчетной области, противоположной боновому ограждению, — устанавливались параметры «Нормальная скорость» и «Концентрация». Для задания нефтяного пятна использовался фильтр

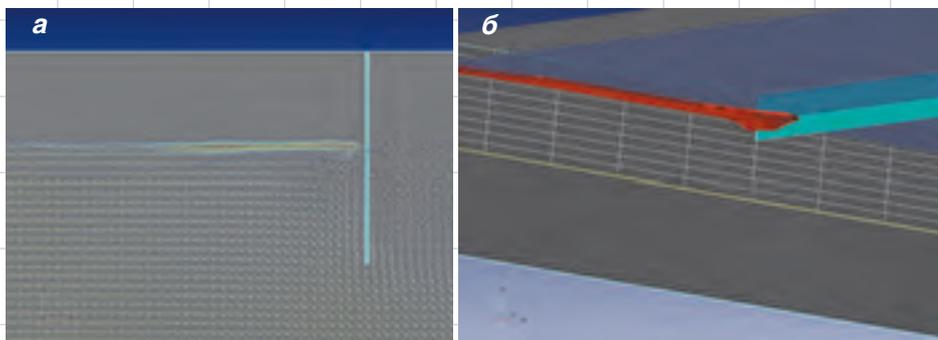


Рис. 6. Определение положения нефтяного пятна и уноса нефти: а — изолинии концентрации нефти; б — изоповерхность концентрации нефти при значении 0,01

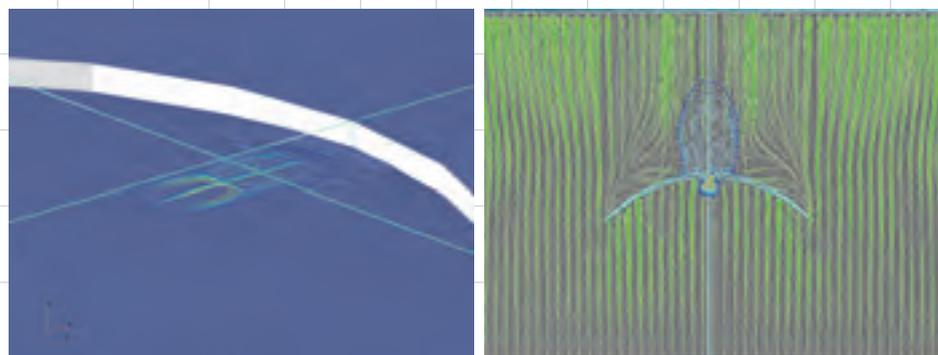


Рис. 7. Результаты эксперимента для параболического бона ($T = 0,5 \text{ м}$, $V = 0,9 \text{ м/с}$, объем разлива — 5 м^3): а — изолинии концентрации нефтепродукта; б — линии тока

«Установка переменной» в виде параллелепипеда.

Следует отметить, что при таком способе задания пятна, как, впрочем, и во всей решаемой задаче, основной проблемой является разрешение сеткой именно нефтяного пятна. Для адекватного физического описания процесса растекания и движения нефти при-

менялась адаптация сетки, которая задавалась перед активацией фильтра по переменной «Концентрация». Опыт моделирования движения нефтяного пятна во фронтальной зоне бонового ограждения показал, что оптимальным является задание адаптации в виде параллелепипеда, ограничивающего определенную область распространения нефти и задание адаптации по решению с использованием градиента.

Положение нефтяного пятна и унос нефти под бон определялись

с помощью положения изолиний и изоповерхностей концентрации (рис. 6).

Кроме того, были проведены исследования влияния размеров расчетной области на описание процесса обтекания бонового ограждения с целью исключения взаимного влияния стенок расчетной области и расположенного в ней ограждения. Выбор размеров расчетной области осуществлялся экспериментально при условии соответствия физических эффектов, возникающих при обтекании

ТЭСИС

**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
— В ПРОМЫШЛЕННОСТЬ**

3D TrueView — трансляция и проверка качества 3D моделей

ABAQUS — прочность

FlowVision — гидродинамика

DEFORM — обработка металлов давлением

www.tesis.com.ru www.flowvision.ru

Тел./Факс: (495) 612-4422, 612-42-62,
E-mail: info@tesis.com.ru

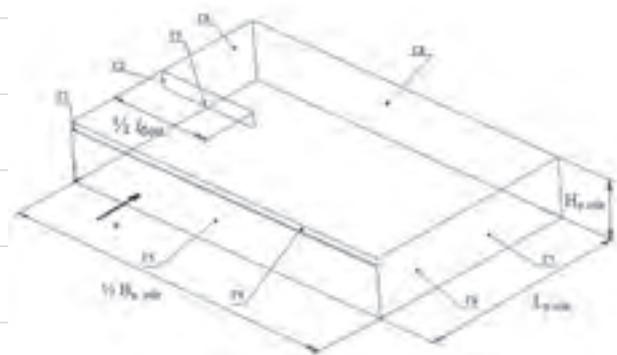


Рис. 5. Расчетная область для исследования обтекания комплекса «ПБО-НСУ»



ПБО в реальных условиях, результатам, получаемым при моделировании на стенде.

Поскольку обтекание бонового ограждения симметричное (рис. 7), то с целью сокращения затрат машинного времени была использована половина расчетной области по плоскости симметрии, для чего установлено граничное условие с нулевыми нормальными и касательными составляющими скоростей.

На созданном виртуальном испытательном стенде для описания зависимости осадки ПБО и производительности НСУ от скорости течения, объема разлива, вязкости нефти и производительности НСУ был поставлен численный эксперимент. В процессе выполнения эксперимента за искомые значения осадки и производительности принимались только полученные в тех опытах, где от-

сутствовал унос нефти под боновое ограждение.

Благодаря этим особенностям для исследования использовались методы теории вероятности и математической статистики, в том числе математическое планирование эксперимента, что позволило сократить количество экспериментов.

Эксперимент проводился при двух уровнях значимости факторов (min/max) (см. таблицу). Диапазоны изменения факторов определялись исходя из условий работы комплекса «ПБО-НСУ» и требований нормативных документов.

На основании экспериментальных данных с помощью программы Statistica 6.0 были получены регрессионные уравнения, связывающие производительность (Q) НСУ и осадку бона (Т) с объемом разлива, вязкостью нефти и скоростью течения (рис. 8).

Диапазоны изменения факторов

	Скорость, м/с	Объем разлива, м ³	Динамический коэффициент вязкости, Н*с/м ²	Осадка
Эксперимент 1	0,1-0,5	0,5-10	0,00123-0,8	—
Эксперимент 2	0,5-1,5	0,5-10	0,00123-0,8	Из эксперимента 1

Из анализа полученных зависимостей можно сделать следующие выводы:

- осадка бонового ограждения в большей степени зависит от скорости течения и вязкости нефти и нефтепродуктов. Больше влияние скорости течения и вязкости, по-видимому, связано с циркуляционным течением внутри нефтяного пятна, возникающим при определенном соотношении вязкости и скорости течения;
- осадка бона более существенно зависит от объема разлива при больших его значениях;

- производительность нефте-сборного устройства необходимо повышать с увеличением скорости течения;
- величина производительности может быть снижена с увеличением осадки бонового ограждения. Такое влияние осадки может быть связано с уменьшением скорости движения нефтяного пятна на поверхности воды и соответственно с улучшением подтекания нефти к заборному устройству НСУ.

Полученные уравнения для определения производительности

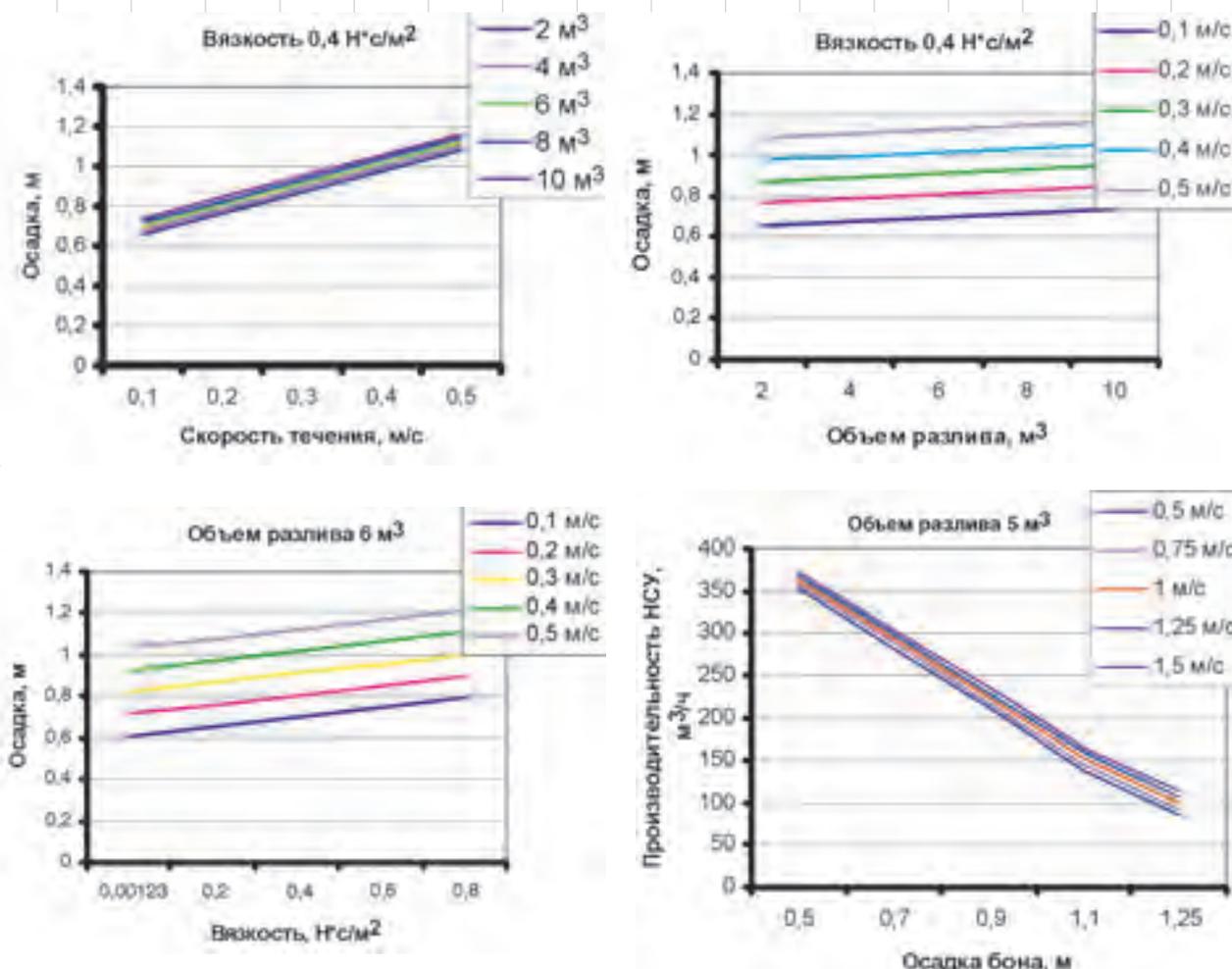


Рис. 8. Графики зависимости осадки бона и производительности НСУ

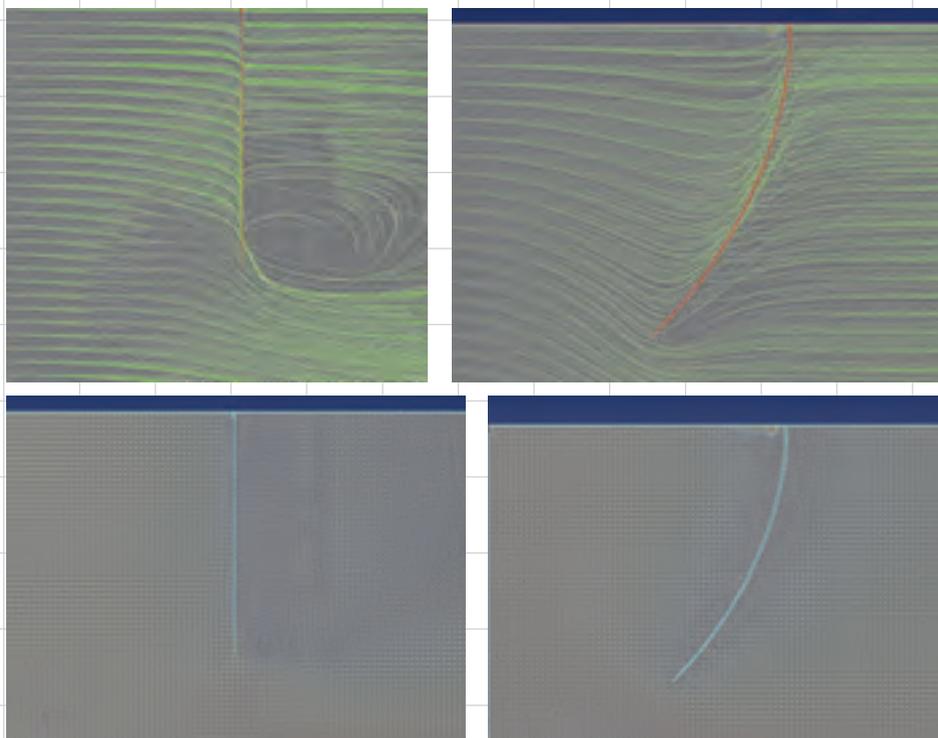


Рис. 9. Линии тока и векторы скорости при обтекании плоского и искривленного бонового ограждения

нефтеборного устройства и осадки бонового ограждения отражают теоретически возможный случай ликвидации аварийного разлива плоским боновым ограждением. Однако на практике, особенно при больших скоростях течений, постановка бона в таком виде невозможна, поскольку на него действует нагрузка со стороны движущегося потока воды, что ведет к изменению его формы — искривлению. При искривленной форме ПБО структура потока в

его фронтальной зоне будет отличной от структуры потока при плоском боне. Типичная картина обтекания бонового ограждения в обоих случаях представлена на рис. 9.

Вероятность уноса нефти под искривленный бон при отсутствии НСУ возрастает с увеличением прогиба ПБО под действием течения.

Однако плоская форма бона способствует распространению нефтяного пятна вдоль него, что

вызывает необходимость в увеличении производительности нефтеборного устройства, поскольку для предотвращения уноса нефти необходимо производить сбор нефти с большей поверхности и соответственно изменять структуру потока в большем объеме, что наглядно показывают проведенные эксперименты (см. рис. 9). При искривлении бонового ограждения линии тока и соответственно распространяющаяся по ним нефть направляются к месту наибольше-

го прогиба ограждения, увеличивая накопление нефти, что способствует улучшению подтекания ее к заборному устройству НСУ и позволяет уменьшить его производительность, предотвращающую унос нефти под бон.

Изгиб бона происходит под действием нагрузки со стороны движущегося потока и зависит от расстояния между его опорами и жесткости.

Для определения вида зависимости производительности и осадки ПБО была проведена серия экспериментов при постоянных значениях осадки, объема разлива и вязкости нефтепродукта (рис. 10). При этом использовался описанный ранее виртуальный стенд на основе программного комплекса FlowVision.

На основании полученных уравнений была разработана математическая модель работы комплекса «ПБО-НСУ».

Достоверность полученных математических моделей проверялась путем их сравнения с результатами натуральных экспериментов, проведенных ВГАВТ в 2004 году с нефтеборным боновым ограждением, и результатами испытаний, выполненных ОНМSETT. Сравнение показало, что полученная математическая модель удовлетворительно связывает характеристики бонового ограждения с условиями эксплуатации судна, характеристиками нефтепродуктов и производительностью нефтеборного устройства.

С помощью полученной математической модели была разработана методика определения при проектировании основных характеристик ПБО с учетом производительности НСУ, свойств нефтепродукта и условий эксплуатации судна. В основе методики лежит выбор технических средств борьбы с разливами нефти в зависимости от нормальной составляющей скорости течения, а также определение таких параметров, как высота юбки и диаметр камеры плавучести, производительности НСУ, на основании полученных математических моделей, описывающих совместную работу ПБО и НСУ.

Автор выражает благодарность сотрудникам фирмы «ТЕСИС» за техническую и научную поддержку при выполнении данной работы.

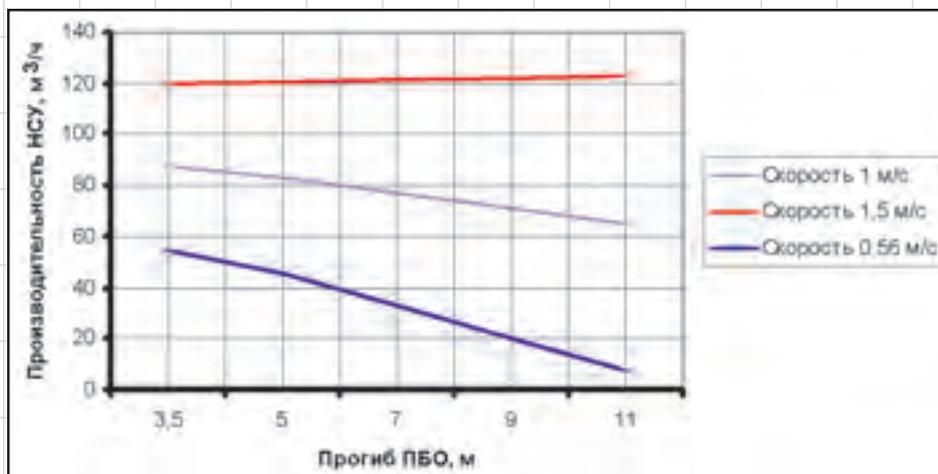


Рис. 10. Зависимость производительности НСУ от прогиба ПБО при различных скоростях течения