

(планов локализации и ликвидации разливов нефти, деклараций промышленной безопасности и пр.), а также при проведении тренажерной подготовки персонала.

#### Список литературы:

[1] Наумов В.С. Оценка ущерба при разливах нефти на объектах транспортного комплекса / В.С. Наумов, А.Е. Пластинин // Журнал университета водных коммуникаций. – 2010. – №5(1). – С. 152–157.

[2] Методика расчета минимальной оснащенности аварийно-спасательных служб (формирований) предназначенных для локализации и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на территории Российской Федерации, на континентальном шельфе и в исключительной экономической зоне Российской Федерации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://mchs.gov.ru/upload/iblock/434/pril\\_001\\_070711.doc](http://mchs.gov.ru/upload/iblock/434/pril_001_070711.doc), свободный. – Загл. с экрана.

*Е.Ю. Чебан, Е.Н. Пузанова*  
*ФБОУ ВПО «ВГАВТ»*

## ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБТЕКАНИЯ БОНОВОГО ОГРАЖДЕНИЯ

В настоящее время для исследования обтекания боновых ограждений и других средств ЛРН, используются как натурные испытания, проводимые в специализированных опытовых бассейнах (например, ОНМSETT), так и CFD-программы, в основе которых лежат численные методы решения дифференциальных уравнений Навье-Стокса [3, 4, 5].

Одной из проблем при численном моделировании гидродинамических явлений является соответствие его результатов данным, полученным в модельных или натуральных экспериментах, проведенных в аналогичных условиях.

Для боновых ограждений, параметром, который позволяет судить об адекватности численного моделирования может быть величина силы сопротивления или коэффициент сопротивления. Точность определения силы сопротивления важна еще и потому, что от ее величины зависит выбор способа якорения, масса и тип якоря, а также общая прочность конструкции.

Большой объем экспериментальных данных по буксировочным испытаниям натуральных образцов боновых ограждений в опытовом бассейне накоплен ОНМSETT. Аналогичные исследования выполнялись и в ВГАВТе. Однако если сравнить обобщенные результаты моделирования, которые по различным данным составляют величины  $C_x=1,845$ ,  $C_x=1,51$ ,  $C_x=1,18$ . Разница в величинах коэффициентов может быть объяснена различной конструкцией испытываемых бонов. Поскольку конкретные особенности испытанных конструкций неизвестны, то оценивать точность численного моделирования по этим данным нельзя. Поэтому для сравнения необходимы специально выполненные буксировочные испытания, результаты которых подтверждаются расчетами по хорошо изученным теоретическим закономерностям. Для боновых ограждений такие расчеты невозможны, поэтому одним из вариантов решения этого вопроса может быть сравнение результатов численного моделирования с результатами буксировок простых тел. Для бонового ограждения такими телами могут быть цилиндр и пластина.

Подобный подход позволяет также подобрать такие параметры моделирования, которые позволят получить адекватные результаты и значительно снизить затраты времени на моделирование в дальнейшем.

В опытовом бассейне НГАВТ в 2011 году А. Красновым [1] и А. Красновым [2] были выполнены исследования обтекания цилиндра и пластины, расположенной против потока. Результаты этих исследований в виде графиков показывающих сравнение экспериментальных и расчетных значений силы сопротивления приведены на рис. 1, 2.

Сравнительное моделирование выполнялось с помощью программного комплекса FlowVision. Для этого была разработана твердотельная геометрия пластины и цилиндра, а также расчетная область в точном соответствии с характеристиками, приведенными в работах [1, 2].

Для моделирования использовалась математическая модель движения вязкой жидкости со свободной поверхностью, состоящая из уравнений движения вязкой жидкости в форме Навье-Стокса, уравнения неразрывности,  $k$ - $\epsilon$ -модели турбулентности, функции VOF, описывающей форму свободной поверхности жидкости [3, 4].

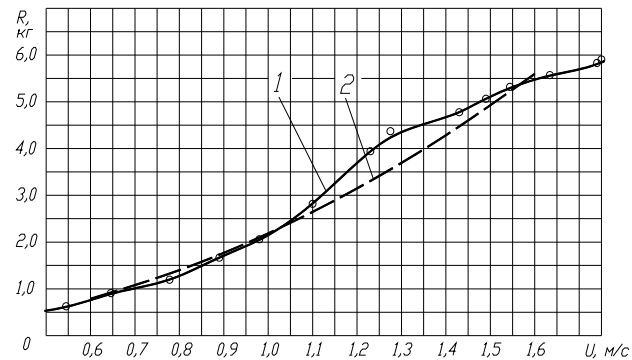


Рис. 1. Кривая сопротивления пластины  
1 – экспериментальная кривая сопротивления; 2 – расчетная кривая сопротивления

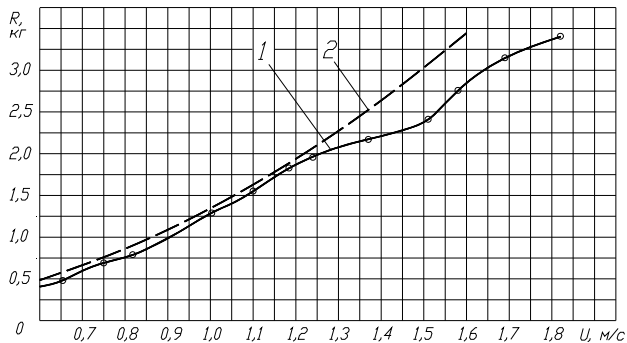


Рис. 2. Кривая сопротивления вертикального кругового цилиндра  
1 – экспериментальная кривая сопротивления; 2 – расчетная кривая сопротивления

В качестве входных условий на передней стенке канала задавались нормальная скорость и начальная степень турбулизации потока. На верхней, нижней и боковых границах канала устанавливалось условие стенки с проскальзыванием. Задняя стенка соответствовала граничному условию выхода. На поверхности пластины и цилиндра было задано условие непротекания с турбулентным пограничным слоем, характеризующимся логарифмическим законом изменения касательной компоненты скорости. Схема расстановки граничных условий приведена на рис. 3.

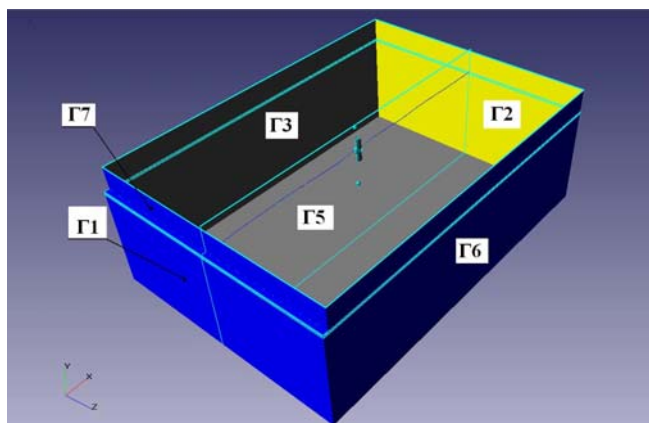


Рис. 3. Типы границ и граничные условия

Из практики использования CFD-программ [5] известно, что на точность численного моделирования наибольшее влияние оказывают размер и «конструкция» расчетной сетки, а также начальная степень турбулизации потока («масштаб турбулентности»). В зависимости от реализованной или иной программы моделей турбулентности и способов расчета турбулентных течений выбор этих параметров при моделировании представляет определенные трудности, поскольку масштаб турбулентности, скорость потока и размер ячеек сетки оказываются в той или иной степени зависимы между собой.

| Грани       | Тип границы                             | Граничное условие  |
|-------------|---|--|
| Г1          | «вход/выход»<br>inlet outlet)           | Задается нормальная компонента скорости $v _w = v_w$   |
| Г2          | «свободный<br>выход»<br>(«free outlet») | Нормальные производные компонент вектора скорости равные нулю $P _w = 0$   |
| Г3, Г5, Г6, | «Стенка»                                | На границе области задано условие прилипания $v _w = 0$  |
| Г7          | симметрия<br>«symmetry»                 | компоненты вектора скорости удовлетворяют одному из условий: $v_i _w = 0$ если $n_i \neq 0$<br>$(\nabla v_i, n) _w = 0$ если $n_i = 0$ |

При моделировании масштаб турбулентности, скорость потока, а также размер сетки изменялись.

В ходе пробного моделирования было выяснено, что расчетная сетка на основе местной адаптации по поверхности цилиндра, в отличие от пластины, приводит к крайне неточным результатам, которые отличаются более чем на 50% от экспериментальных или расчетных, как это видно из рис. 4. Наиболее согласующиеся с экспериментальными данными, результаты для пластины, были получены при измельчении сетки в районе свободной поверхности. Размер ячейки при этом составил около 4 мм по вертикали.

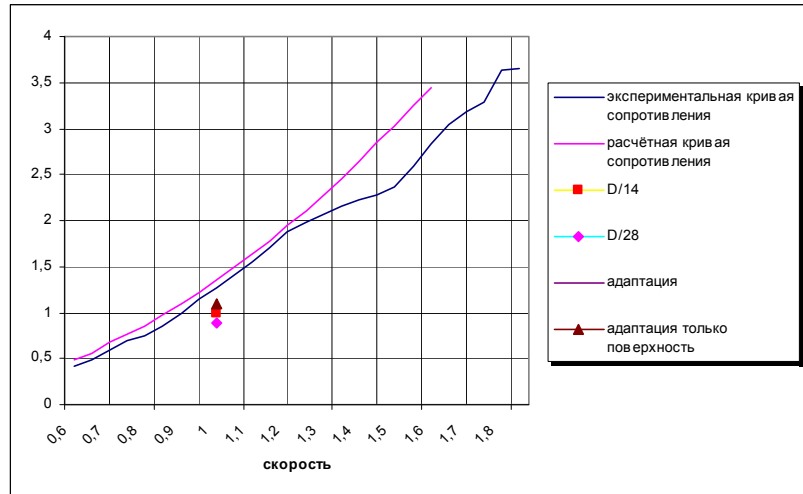


Рис. 4. Результаты пробных численных экспериментов с мелкой сеткой и адаптацией по поверхности цилиндра

Сравнение результатов моделирования и буксировки для пластины приведены на рис. 5. Из рисунка видно, для масштаба турбулентности 0,1 результаты численного моделирования точно согласуются с расчетными и в области скоростей 1–1,5, где на экспериментальной кривой наблюдаются существенные отличия.

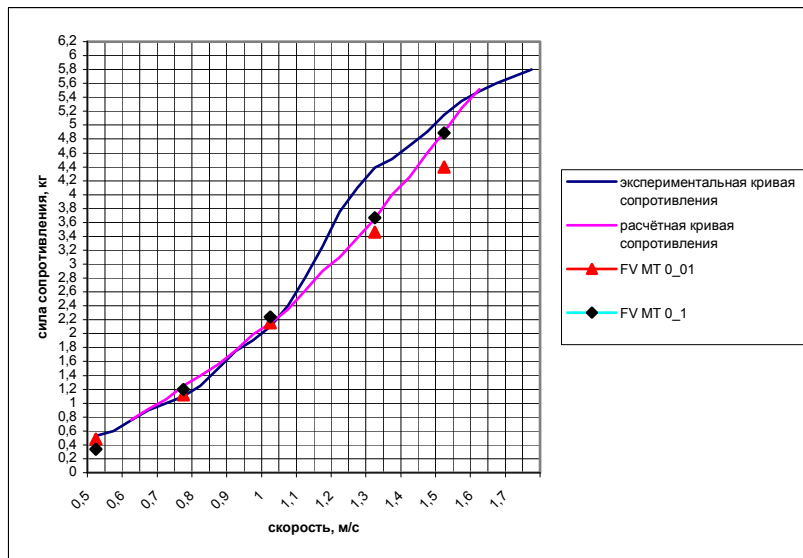


Рис. 5. Сравнение результатов численного моделирования для пластины и буксировок в опытном бассейне НГАВТ

Результаты моделирования обтекания цилиндра с помощью программного комплекса FlowVision в сравнении с буксировками приведены на рис. 6. на рисунке приведены экспериментальная и расчетная кривая вместе с точками, полученными при различном размере сетки в виде отношения диаметра цилиндра  $D$  к количеству ячеек сетки в поперечном направлении цилиндра. Масштаб турбулентности составлял 0,1 и 0,01.

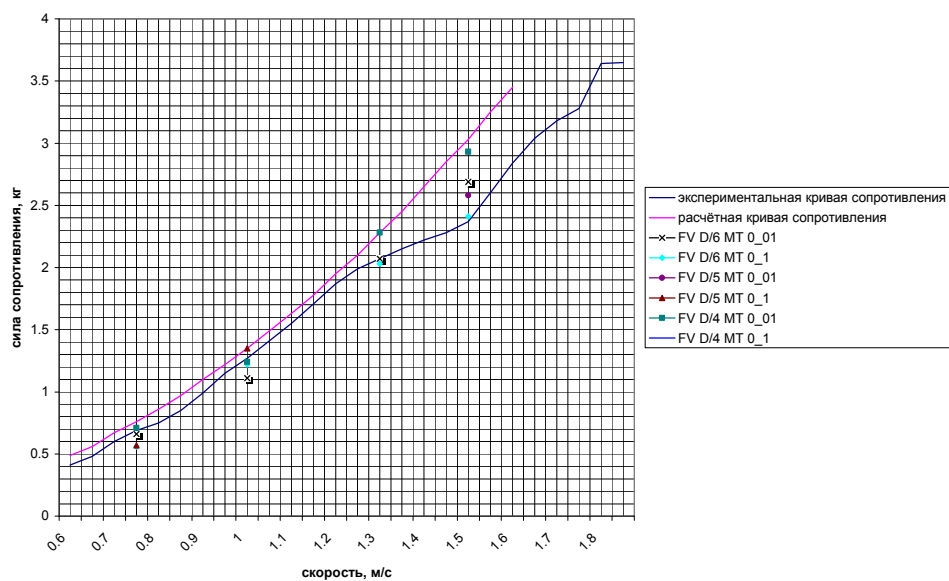


Рис. 6. Сравнение результатов численного моделирования для цилиндра и буксировок в опытовом бассейне НГАВТ

Как видно из рисунка, наиболее приближенные к эксперименту данные, получаются при размере ячеек  $D/6$  и масштабе турбулентности  $0,1$ . Однако, при значениях  $0,01$  и  $D/6$  в диапазоне скоростей от  $1$  до  $1,5$  м/с значения ближе к экспериментальным результатам. Полученные данные при скоростях  $0,75-1$  м/с значения лежат довольно близко как к экспериментальным, так и расчетным данным, за исключением результатов полученных при  $D/6$  и масштабе  $0,01$ , которые при больших скоростях лежат внутри области между обеими кривыми.

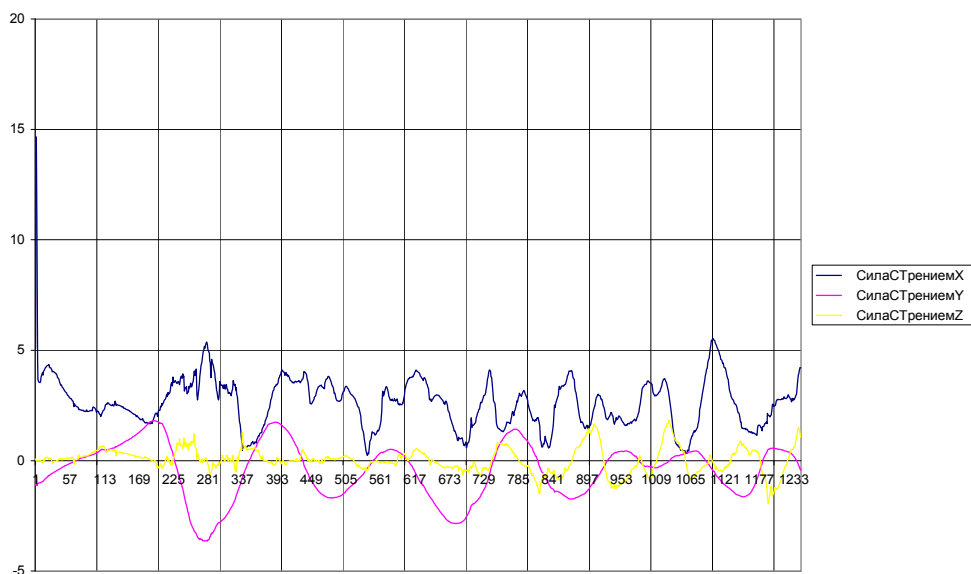


Рис. 7. Изменение давления на поверхности цилиндра с течением времени

При численном моделировании был проверен интересующий с точки зрения работоспособности боновых ограждений случай скорости  $0,5$  м/с. В работах [1, 2] дан-

ных для этой скорости получить не удалось. Как показало численное моделирование, при скорости потока 0,5–0,75 м/с обтекание цилиндра крайне неустойчиво при любом размере сеток и вихрей. Обтекание сопровождается интенсивным срывом вихрей с поверхности цилиндра, которое можно отследить по состоянию свободной поверхности жидкости в расчетной области. Кривые изменения давления с течением модельного времени на поверхности цилиндра носят периодический характер с очень значительной амплитудой. Это позволяет предположить, что унос нефти под боновое ограждение с цилиндрическим поплавком может быть обусловлен не только гидродинамикой двухфазных процессов, но и влиянием отрывных течений при скоростях около 0,5 м/с.

Таким образом, по проведенной работе можно сделать следующие выводы:

– с помощью программного комплекса FlowVision может быть достигнута необходимая точность моделирования, что подтверждается экспериментальными и расчетными данными;

– определены начальные масштабы турбулентности и размеры расчетной сетки, при которых обеспечивается достаточная точность результатов численного моделирования.

#### Список литературы:

- [1] Краснов А.В. Вихревое сопротивление перпендикулярной к потоку пластины, МОРИНТЕХ-2011, Специальный выпуск № 2 2011, 16–18.
- [2] Краснов А.В. Вихревое сопротивление вертикального кругового цилиндра, МОРИНТЕХ-2011, Специальный выпуск № 2 2011, 13–15.
- [3] 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.
- [4] Чебан Е.Ю. Численное моделирование обтекания нефтесборного бонового ограждения с применением программного комплекса «FlowVision». // Вестник ВГАВТ: Надежность и ресурс в машиностроении. – Н.Новгород: Изд. ФГОУ ВПО ВГАВТ, 2005. – С. 130–139.
- [5] 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» Т. 1, – М.: Изд. МФТИ, 2009. – С. 81.