

Численное моделирование обтекания корпуса судна в условиях мелководья

А.В. Печенюк
ООО “Digital Marine Technology”
andrew@digitalmarine.net

Численное моделирование обтекания корпусов морских судов с помощью комплексов гидродинамического анализа в настоящее время начинает приобретать в задачах проектирования судна практическое значение. Получение полной картины потока, обтекающего корпус, на ранних стадиях его проектирования позволяет качественно решать задачи оптимизации формы корпуса и конфигурации выступающих частей; изучения условий работы движителей, рулевых и подруливающих устройств; нахождения характеристик ходовой посадки быстроходных судов; определения мощности энергетической установки судна. Исследования буксировочного сопротивления судов в условиях ходовых испытаний, выполненные ранее в программном комплексе “Flow Vision” ([1], [2]), свидетельствуют о хорошем соответствии расчетных и экспериментальных результатов.

В практике проектирования судов многих типов большое значение также имеет получение буксировочных характеристик корпуса в особых случаях эксплуатации: на ограниченном фарватере, при ветре, морском волнении. Определение буксировочного сопротивления и условий работы движителей и их оптимизация в условиях мелководья играют важную роль при проектировании речных судов и судов прибрежного плавания. Возможности численного моделирования движения судов в таких режимах пока остаются слабоизученными.

Наиболее надежным методом исследования движения судна в условиях мелководья в настоящее время остается модельный эксперимент в опытовом бассейне. Изучение многочисленных экспериментальных данных позволило сформировать некоторые общие представления о характере физических явлений, имеющих место при обтекании корпуса судна в этих условиях.

Известно, что степень влияния мелководья на сопротивление движению судна зависит от соотношения между размерами его корпуса и глубиной воды, а также от относительной скорости движения и в некоторой мере от формы обводов судна. Для количественной оценки степени влияния мелководья обычно используются следующие безразмерные параметры:

1. отношение глубины воды к осадке судна $\frac{H}{T}$, характеризующее степень стеснения потока по глубине;
2. число мелководья Fr_H , или относительная скорость движения судна в условиях ограниченной глубины

$$Fr_H = \frac{v}{\sqrt{gH}} = \sqrt{\frac{L}{H}} \cdot Fr$$

Ограниченная глубина фарватера влияет на все составляющие сопротивления воды движению судна, однако степень их изменения в условиях мелководья по сравнению со случаем движения судна на глубокой воде оказывается различной.

Изменение вязкостных составляющих сопротивления воды (сопротивления трения и сопротивления формы) при движении судна в условиях ограниченной глубины фарватера связано с возрастанием местных скоростей обтекания корпуса из-за влияния дна водоема, то есть с появлением встречного потока (иначе, «потока вытеснения»). При относительных глубинах $\frac{H}{T} > 3$ это изменение незначительно.

При дальнейшем уменьшении глубины воды до значений $\frac{H}{T} = 1.5 \div 2.5$ вязкостное сопротивление может возрасти на 10 – 15% по сравнению с его величиной для случая движения судна с теми же скоростями на глубокой воде. Поскольку вязкостное сопротивление как на глубокой, так и на мелкой воде приблизительно пропорционально квадрату скорости, то относительное возрастание этого сопротивления на мелководье практически не зависит от скорости.

Наиболее сильно влияние мелководья сказывается на величине и характере изменения волнового сопротивления. Резкое изменение волнового сопротивления связано в данном случае с различием свойств, которыми обладают корабельные волны, образующиеся на глубокой и мелкой воде.

Между длиной поперечных волн, образующихся при движении судна на мелкой и глубокой воде (λ_H и λ_∞), а также между скоростью распространения волнового профиля в этих условиях (v_H и v_∞), существуют соотношения:

$$\frac{\lambda_H}{\lambda_\infty} = \operatorname{cth} \frac{2\pi H}{\lambda_H} > 1 \text{ при } v_H = v_\infty,$$

$$\frac{v_H}{v_\infty} = \sqrt{\operatorname{th} \frac{2\pi H}{\lambda_H}} < 1 \text{ при } \lambda_H = \lambda_\infty.$$

Предельная скорость распространения поперечных волн на мелководье теоретически достигает значения $v_{кр} = \sqrt{gH}$ и равна скорости перемещения одиночной волны, имеющей вид бугра с возвратно-поступательным движением частиц жидкости.

Пока скорость движения судна на мелководье такова, что длина образующихся при этом волн незначительно отличается от длины волн на глубокой воде, картина волнообразования в обоих случаях практически остается одинаковой (см. рис. 1). Наблюдения показывают, что это условие соблюдается при скорости $v \leq 0.4\sqrt{gH}$ (при $Fr_H \leq 0.4$).

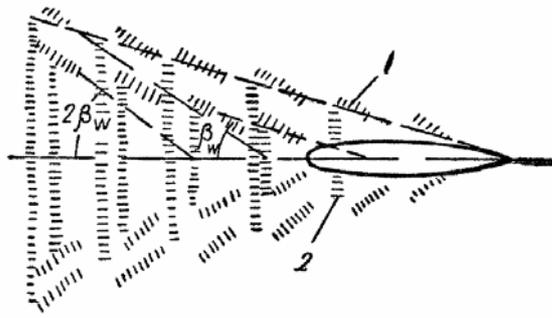


Рис. 1. Характер корабельных волн на глубокой воде:
1 – гребни расходящихся волн; 2 – гребни поперечных волн

Вместе с увеличением длины волн при дальнейшем возрастании скорости движения судна на мелководье начинается трансформация картины волнообразования (рис. 2, а). В результате этого увеличивается угол раствора расходящихся волн, искривляется их фронт, который оказывается обращенным выпуклой стороной к судну, и одновременно возрастает высота волнового профиля.

По мере приближения скорости к значению $v_{кр} = \sqrt{gH}$ фронт расходящихся волн носовой группы разворачивается настолько, что они сливаются с поперечными волнами, образуя общую поперечную волну, движущуюся вместе с судном и расположенную около форштевня (рис. 2, б). По своим свойствам такая волна приближается к одиночной волне, а ее высота при малых отношениях $\frac{H}{T}$ и для судов с полными обводами может оказаться весьма значительной.

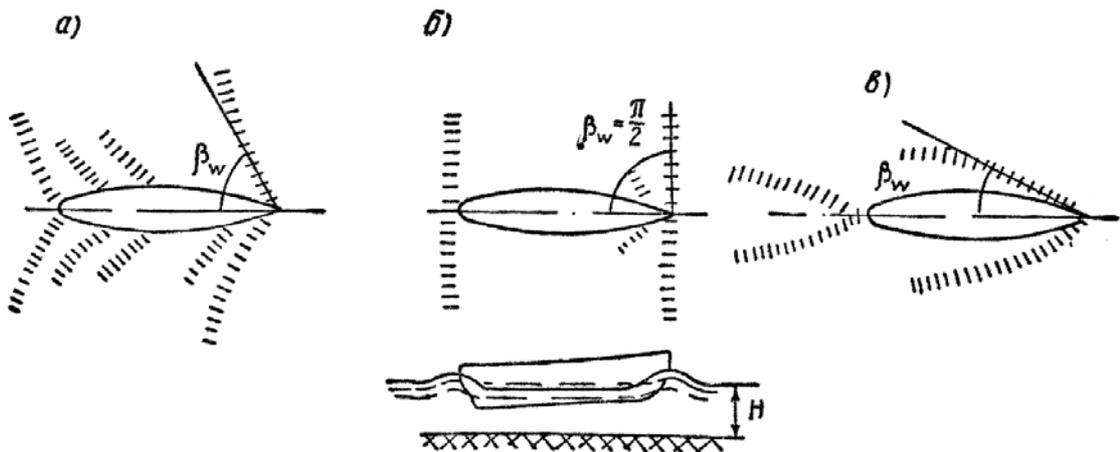


Рис. 2. Изменение характера корабельных волн на мелководье в зависимости от относительной скорости:
а) начало трансформирования волн; б) волны при критической скорости; в) волны при закритических скоростях

При скоростях, превышающих значение $v_{кр} = \sqrt{gH}$, поперечная волна исчезает, и около судна остается лишь система расходящихся волн с фронтом, обращенным вогнутой стороной к судну (рис. 2, в). Угол раствора таких расходящихся волн уменьшается с ростом скорости, приближаясь при больших скоростях к значению этого угла на глубокой воде.

Таковы вкратце основные физические явления, сопровождающие движение судна на фарватере ограниченной глубины. Более подробные сведения об особенностях обтекания корпуса судна на мелководье можно найти в учебных пособиях по теории и гидродинамике судна, например в [3], [4].

Очевидно, при таком значительном отличии качественной физической картины, наблюдаемой при обтекании корпуса судна на глубокой воде и мелководье, постановка численных расчетов для этих случаев также должна иметь свои особенности.

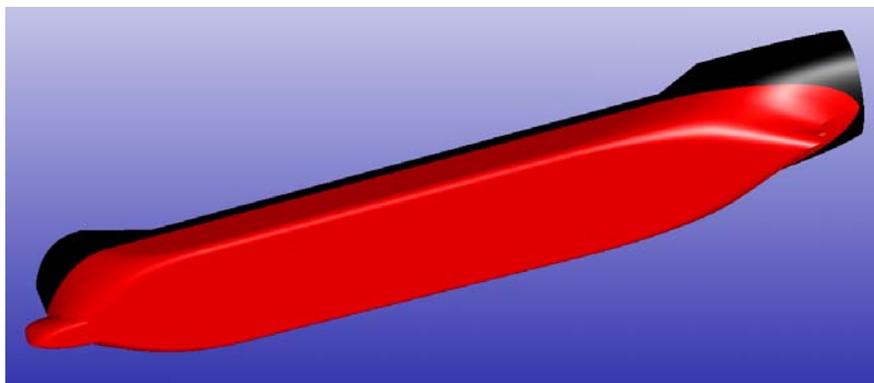


Рис. 3. Аналитическая модель корпуса судна прибрежного плавания

Объект исследования – аналитическая модель корпуса судна прибрежного плавания дедвейтом около 3150 т (см. рис. 3), главные размеры судна следующие:

Длина по ватерлинии	84.52 м
Длина между перпендикулярами	84.49 м
Ширина	13.30 м
Осадка	4.50 м
Водоизмещение объемное	4274 м ³

Ранее для этого судна в комплексе “Flow Vision” автором доклада было выполнено численное исследование буксировочных характеристик на глубокой воде, по результатам которого получена зависимость сопротивления корпуса от скорости буксировки. Поэтому для подготовки моделирования буксировки на мелководье был использован готовый вариант расчета судна на глубокой воде. Это было выполнено следующим образом.

В расчетный вариант для случая движения на глубокой воде, подготовленный так же, как в [2], был загружен фильтр пластины, моделирующей дно водоема (см. рис. 4).

При этом удалось сохранить не только исходные данные и расчетную сетку, но и продолжить расчет, используя уже сформировавшееся в условиях глубокой воды решение. Такой подход позволяет экономить расчетное время, так как адаптация решения к изменениям происходит значительно быстрее, чем формирование нового решения, а также делает более обоснованным сопоставление результатов, полученных для глубокой воды и мелководья, поскольку расчеты выполняются в полностью одинаковых условиях.

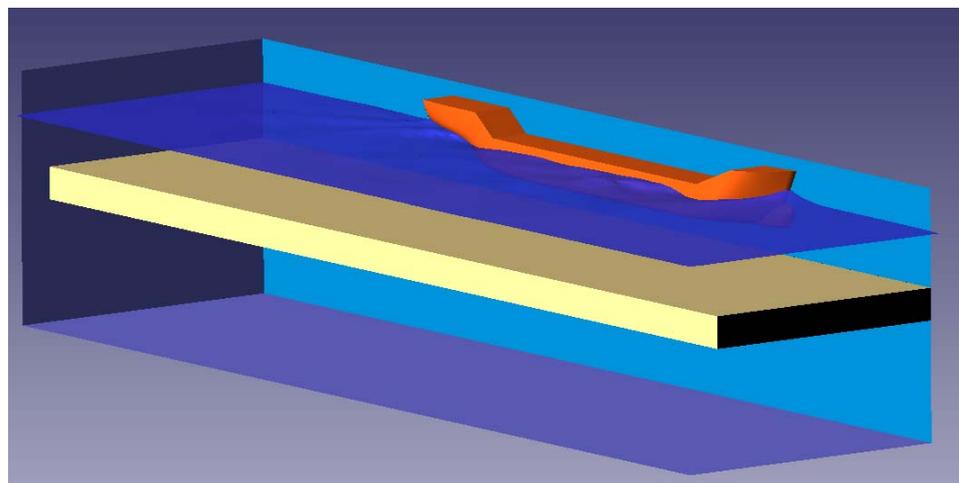


Рис. 4. Геометрия расчетного варианта

Следует отметить, что в отличие от моделирования движения на глубокой воде, случай движения на мелководье для рассматриваемого судна требует значительного усложнения, так как необходимо учитывать изменение посадки судна. При расчетной скорости буксировки 11.5 узлов для данного судна $Fr = 0.203$ и на глубокой воде динамическое изменение посадки настолько незначительное, что при моделировании его можно не учитывать. Однако на мелководье $Fr_H = \frac{v}{\sqrt{gH}} = 0.630$, что достаточно близко к критическому значению, а по мере приближения к критической скорости $Fr_H = 1$ наблюдается гораздо более значительное изменение посадки, которое происходит таким образом, что в этих условиях увеличивается средняя осадка и образуется дифферент судна на корму (рис. 5). Корректное моделирование изменения посадки судна на мелководье очень важно с точки зрения ее влияния на распределение динамического давления и силу сопротивления судна. Выполненные расчеты показали, что в случае фиксирования модели в гидростатическом положении картина обтекания корпуса судна на мелководье не соответствует базовым физическим представлениям: наблюдается падение давления между днищем судна и дном водоема, в результате которого значительно ослабевают волновые системы и происходит уменьшение силы сопротивления по сравнению со значением на глубокой воде. В реальности имеет место противоположная ситуация.

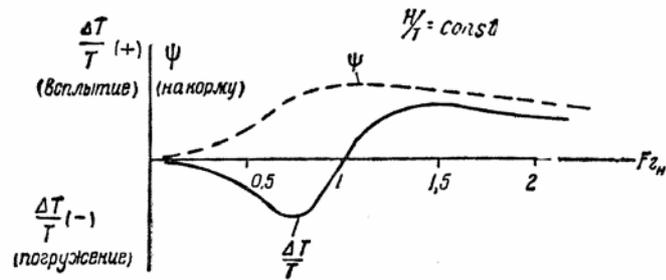
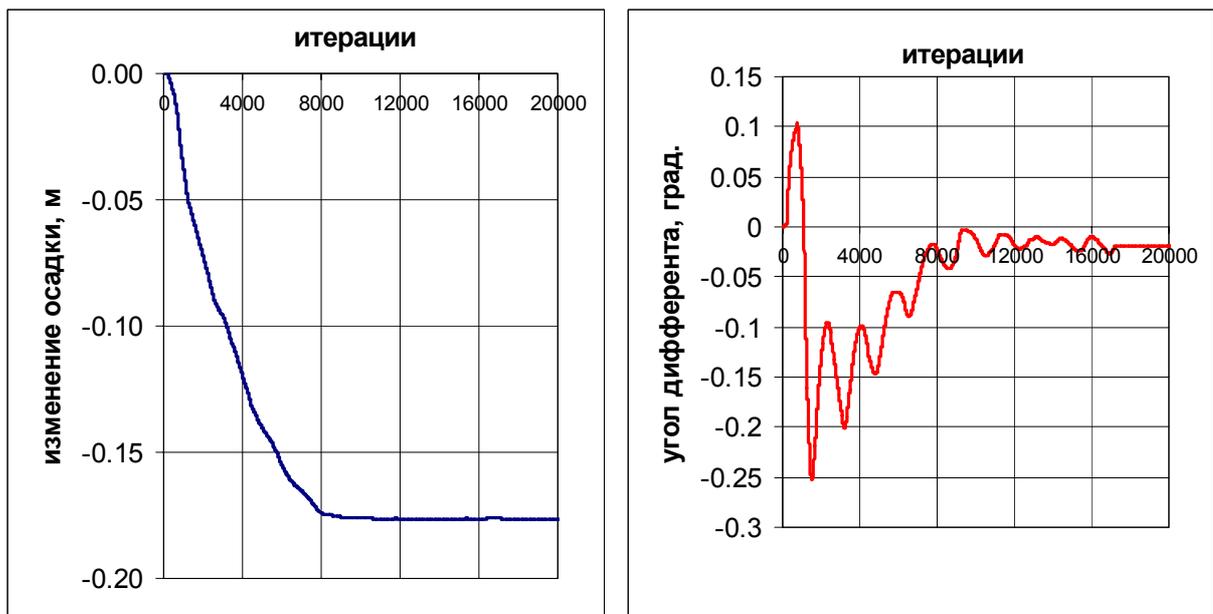


Рис. 5. Изменение посадки судна на ходу в условиях мелководья

Для моделирования изменений посадки судна на ходу модель корпуса судна была загружена в расчет как фильтр подвижного тела со степенями свободы вдоль вертикальной оси (по осадке) и вокруг горизонтальной поперечной оси (по углу дифферента). Изменения посадки происходили и отслеживались в течение всего расчета (рис. 6).



а

б

Рис. 6. Изменение посадки судна в ходе расчета

а – изменение осадки, б – изменение угла дифферента (“–” – на корму)

Как видно из рис. 5 и 6, ходовая посадка в расчете, по крайней мере, качественно соответствует теоретическим данным: при $Fr_H = 0.630$ наблюдается увеличение средней осадки и дифферент на корму.

Кривая буксировочного сопротивления судна на глубокой воде и сопротивление на мелководье при скорости 11.5 узлов представлены на рис. 7.

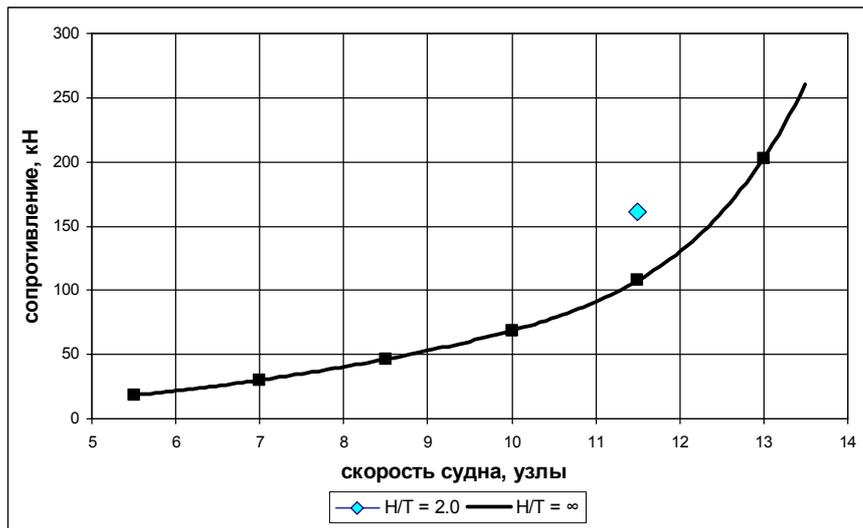


Рис. 7. Буксировочное сопротивление судна

Из рис. 7 видно, что буксировочное сопротивление на мелководье возросло более чем в 1.5 раза. К сожалению, нет возможности проверить этот результат путем сопоставления с экспериментом ввиду отсутствия соответствующих экспериментальных данных. Эмпирические методики оценки влияния мелководья на ходовые качества (например, [5], [6]) также нельзя в данном случае применить для сопоставления, так как они позволяют рассчитать лишь потерю скорости хода судна, которая обусловлена не только увеличением буксировочного сопротивления, но в значительной степени и изменением коэффициентов взаимодействия системы «корпус – движитель». Остается лишь отметить, что порядок увеличения сопротивления по данным численного моделирования является вполне типичным для рассматриваемого режима движения на мелководье, о чем можно судить по рис. 8, на котором представлен характер изменения сопротивления судна на мелководье, полученный путем осреднения большого числа результатов модельных экспериментов.

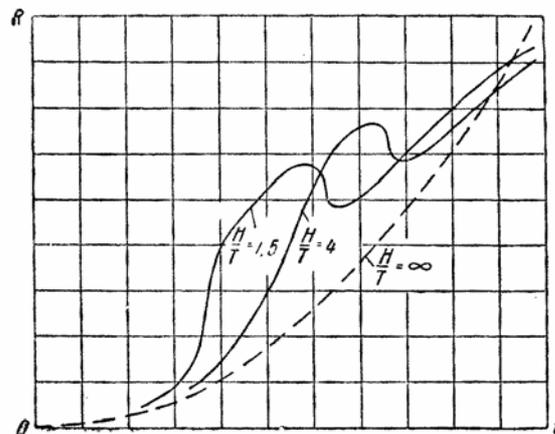


Рис. 8. Общий характер изменения буксировочного сопротивления судна на мелководье

Любопытно сопоставить качественную картину обтекания корпуса на глубокой воде и мелководье по результатам численного моделирования. На рис. 9 представлены результаты сопоставления волновых систем для этих случаев. Хорошо заметны усиление поперечных волн у оконечностей и увеличение амплитуды корабельных волн в целом на мелководье. О волнообразовании судна можно также судить по рис. 10, на котором даны перспективные изображения свободной поверхности.

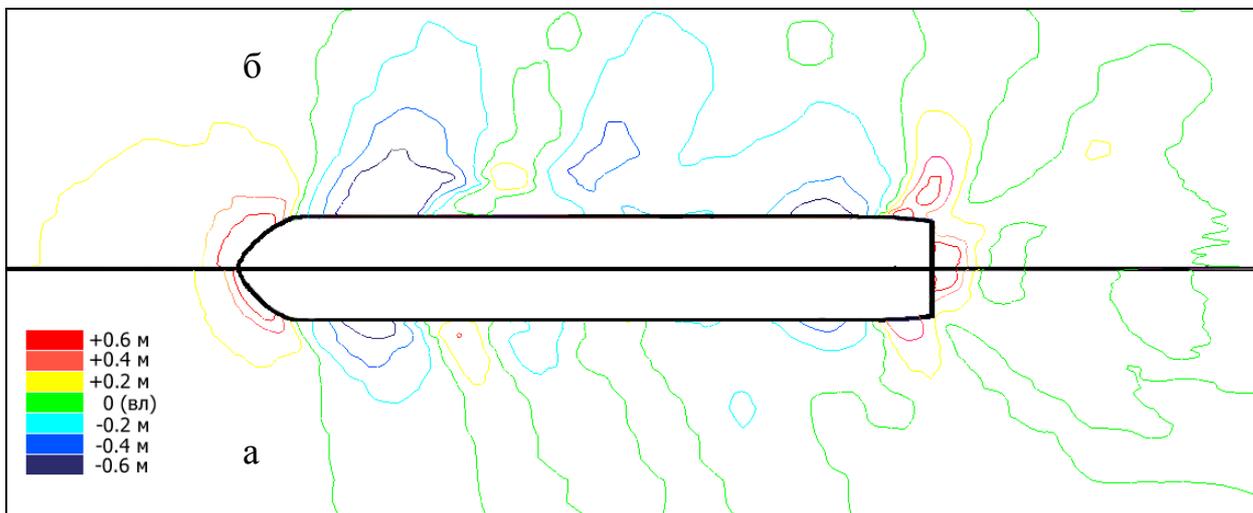


Рис. 9. Волновая система судна при скорости 11.5 узлов ($Fr = 0.203$)
а – глубокая вода $H/T = \infty$; б – мелководье $H/T = 2$

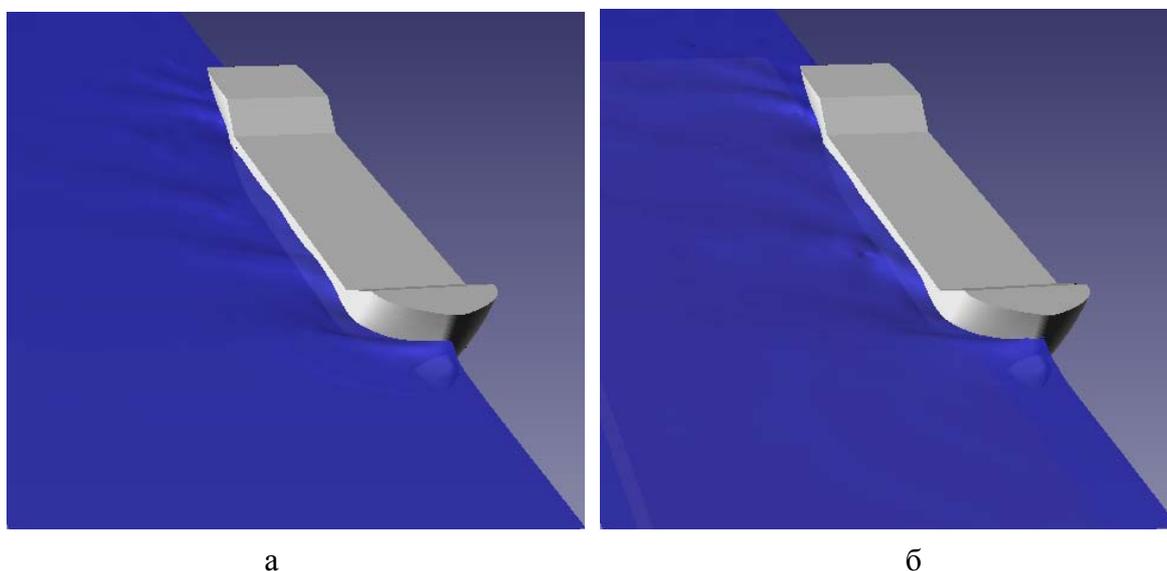


Рис. 10. Перспективное изображение свободной поверхности
а – $H/T = \infty$; б – $H/T = 2$

Очень наглядно, по мнению автора, влияние мелководья иллюстрируют изоповерхности динамического давления в окружающей корпус жидкости (рис. 11) и распределение динамического давления по корпусу судна (рис. 12).

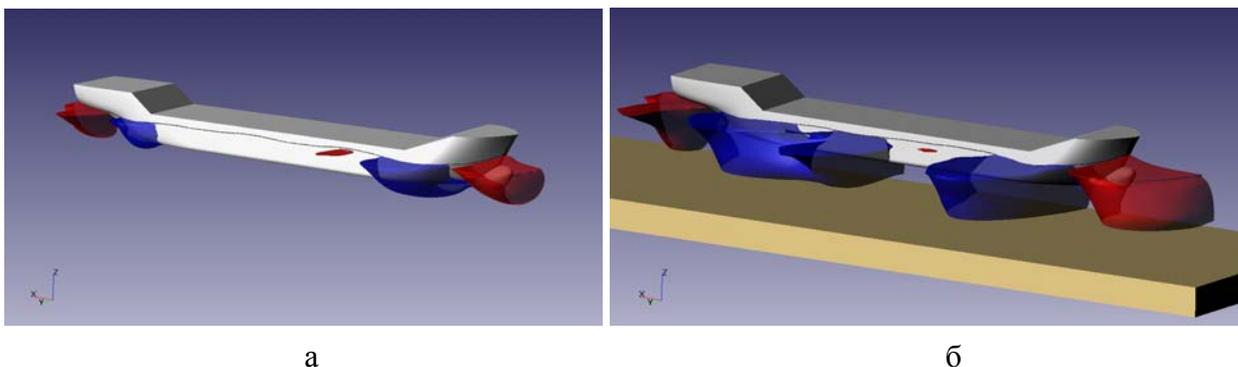


Рис. 11. Изоповерхность динамического давления 2500 Па (синим цветом показано отрицательное давление, красным – положительное)

а – $H/T = \infty$; б – $H/T = 2$

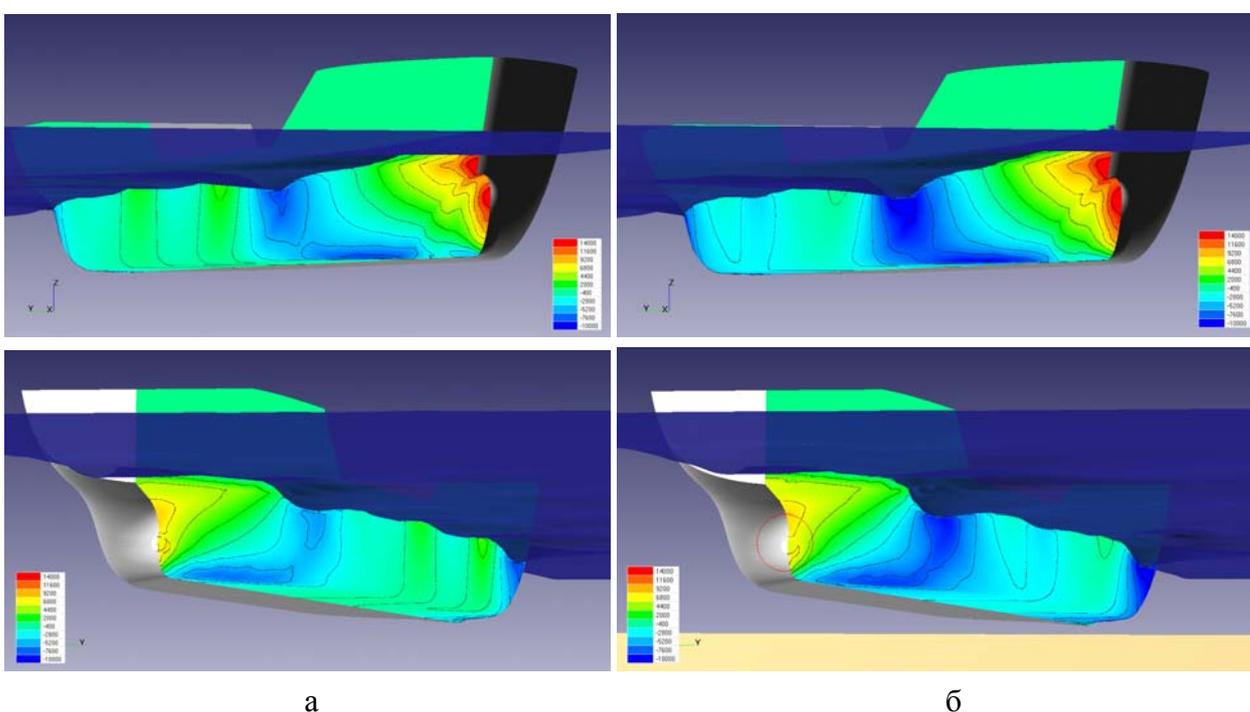


Рис. 12. Распределение динамического давления по корпусу судна

а – $H/T = \infty$; б – $H/T = 2$

Оценивая результаты выполненного расчета, отметим следующее. Полученные результаты численного моделирования хорошо согласуются с теоретическими сведениями о характере физических явлений, сопровождающих буксировку судна на мелководье в рассмотренном режиме. Для уточнения возможностей численного моделирования в вопросе определения силовых характеристик желательно по аналогичной методике выполнить расчеты в условиях, допускающих возможность сопоставления их результатов с результатами эксперимента.

Основной особенностью выполненного расчета по сравнению с моделированием буксировки судна на глубокой воде оказалось значительное изменение посадки судна на ходу и ее влияние на силу буксировочного сопротивления. Поэтому в ходе подобных

расчетов необходимо определять равновесное положение судна под действием статических и динамических составляющих силы поддержания, используя технологию фильтра подвижного тела для моделирования корпуса судна.

Литература

1. Aksenov A., Pokhilko V., Dyadkin A. Numerical Simulation of Water Flow around Ship with Screw Propeller // Proceedings of ASME PVP, COMPUTATIONAL TECHNOLOGY (CFD), July 22-26, 2001 Hyatt Regency, Atlanta, Georgia, USA
2. А.В. Печенюк. Моделирование буксировочных испытаний перспективного контейнеровоза KRISO при помощи комплекса гидродинамического анализа "Flow Vision"// Труды конференции "Инженерные системы 2005", серия "Прикладные исследования в механике", изд. МФТИ, 2005, стр. 46-54
3. П.А. Апухтин, Я.И. Войткунский. Сопротивление воды движению судов. М.: Машгиз, 1953. – 356 с.
4. А. А. Костюков. Сопротивление воды движению судов. Л.: Судостроение, 1966. – 448 с.
5. Lackenby H. The Effect of Shallow Water on Ship Speed. – The Shipbuilder and Marine Enginebuilder, September 1963, p. 13 – 19
6. Scott I.R. A Shallow Water Speed Corrector. Quarterly Transactions of the Royal Institution of Naval Architects. October 1966, vol. 108, N 4, p. 431 – 440