

Моделирование буксировочных испытаний перспективного контейнеровоза KRISO при помощи комплекса гидродинамического анализа “Flow Vision”

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

Моделирование обтекания корпусов морских судов с помощью комплексов гидродинамического анализа в настоящее время приобретает все большее практическое значение в отечественных и зарубежных проектных организациях. Получение полной картины потока, обтекающего корпус судна, 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. Однако совершенно очевидно, что все перечисленные выше преимущества методов вычислительной гидромеханики могут быть в полной мере реализованы только при условии хорошей согласованности получаемых результатов с наиболее надежными экспериментальными и теоретическими данными.

Доклад посвящен серии расчетов буксировочного сопротивления перспективного контейнеровоза, разработанного в Корейском Исследовательском Институте Корабля и Океанотехники (KRISO), выполненных в программном комплексе “Flow Vision”. Объект изучения представляет собой современное крупное грузовое судно, предназначенное для транспортировки контейнеров международного стандарта на океанских линиях с высокой эксплуатационной скоростью. Примером существующих судов такого типа является т/х “Susan Maersk” (см. рис. 1).



Рис. 1. Контейнеровоз “Susan Maersk”

В ходе разработки проекта судна были выполнены экспериментальные исследования в опытовом бассейне KRISO, материалы исследований и трехмерная аналитическая модель обводов корпуса были опубликованы на сайте [1], посвященном международной конференции по вопросам гидродинамики судна “Gothenburg 2000”, и рекомендованы для тестирования программных



комплексов гидродинамического анализа в задачах определения буксировочных характеристик морских судов. Действительно, размеры и оснащение опытового бассейна KRISO позволяют испытывать модели таких размеров, которые сводят к минимуму влияние масштабных эффектов, а выбранные обводы относятся к наиболее изученному, можно сказать, классическому типу, характерному для современных скоростных торговых судов. Основные характеристики судна в масштабах природы и модели следующие.

	Природа	Модель
Длина между перпендикулярами L_{bp} (м)	230.0	7.2786
Ширина B (м)	32.2	1.0190
Высота борта D (м)	19.0	0.6013
Осадка T (м)	10.8	0.3418
Водоизмещение объемное V (м ³)	52030.0	1.6490
Площадь смоченной поверхности Ω (м ²)	9424.0	9.4379
Коэффициент общей полноты C_b		0.6505
Коэффициент полноты миделя C_m		0.9849
Абсцисса ЦВ LCB (%), в нос «+»		-1.48
Масштаб	31.5994 : 1.0000	

Согласно принятой в настоящее время методике проведения испытаний моделей морских судов, в опытовом бассейне определена безразмерная зависимость коэффициента остаточного сопротивления модели от ее относительной скорости – числа Фруда (см. рис. 2). Такую зависимость получают следующим образом. Из величины полного сопротивления, замеренной на испытаниях для каждой скорости модели, вычитают сопротивление трения эквивалентной технически гладкой пластины, площадь поверхности которой равна площади поверхности модели. Полученная величина разности – остаточное сопротивление – затем преобразуется в безразмерный коэффициент остаточного сопротивления по формуле:

$$C_r = \frac{R_o}{0.5 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot \Omega},$$

где: R_o - величина остаточного сопротивления, Н;

ρ - плотность жидкости в бассейне, кг/м³;

v - скорость модели, м/с;

Ω - площадь смоченной поверхности модели, м².

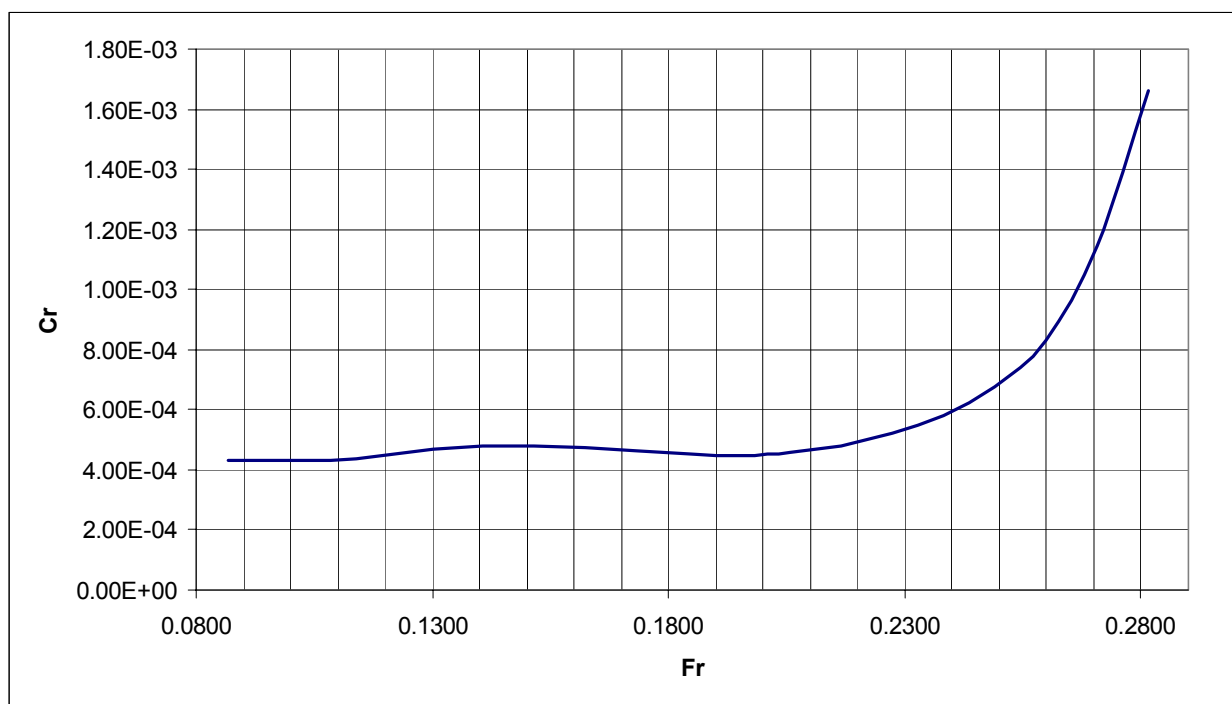


Рис. 2. Экспериментальная зависимость коэффициента остаточного сопротивления от числа Фруда

Заметим, что экспериментальная зависимость коэффициента остаточного сопротивления от числа Фруда полагается одинаково справедливой для модели и натуре и выражает собой зависимость сил сопротивления, не подверженных масштабным эффектам, от скорости движения судна. Для получения же зависимости силы полного сопротивления натурального судна от его скорости необходимо выполнить пересчет с учетом силы сопротивления трения, вычисленной в соответствии с числами Рейнольдса, характеризующими режим течения в пограничном слое судна, по следующей методике.

Сила полного сопротивления рассчитывается в виде $R = C_t \frac{\rho \cdot v^2}{2} \cdot \Omega$.

Коэффициент полного сопротивления представляет собой сумму $C_t = C_r + C_f + \zeta$,

где: C_r - коэффициент остаточного сопротивления;

C_f - коэффициент сопротивления трения эквивалентной пластины;

ζ - корреляционная надбавка, согласно рекомендациям [3] $\zeta = 0.1 \cdot 10^{-3}$.

Коэффициент сопротивления трения эквивалентной пластины рекомендуется рассчитывать по известной формуле Прандтля – Шлихтинга: $C_f = \frac{0.455}{(\lg Re)^{2.58}}$.

В дальнейшем, при сравнении экспериментальных и расчетных данных, сопоставляются «размерные» зависимости сопротивления судна от скорости – прямые результаты расчетов в комплексе “Flow Vision” в масштабе натуре и результаты

пересчета модельного эксперимента на натуру, а также «безразмерные» – прямые результаты модельного эксперимента (рис. 2) и результаты обратного пересчета результатов расчетов в комплексе “Flow Vision” на модель.

При подготовке численных расчетов в комплексе “Flow Vision” основной задачей являлось соблюдение условий, позволяющих выполнить адекватное сопоставление результатов расчета и эксперимента. Учитывая сложности постановки расчетов в масштабе модели, связанные с учетом масштабных эффектов и назначением параметров начальной турбулизации потока, более простым и надежным способом рассчитать сопротивление судна в комплексе “Flow Vision” является постановка расчета в масштабе натуре.

Расчеты выполнены в прямоугольной расчетной области для половины судна, симметричного относительно своей диаметральной плоскости, методом обращения потока. Размеры расчетной области выбраны с учетом рекомендаций по испытанию моделей судов в опытовых бассейнах, устанавливающих допустимые отношения поперечных размеров модели и чаши бассейна, при которых гарантируется отсутствие заметного влияния стенок на результаты испытаний. Общий вид расчетной области с моделью судна и указанием типов граничных условий на ее стенках представлен на рисунке 2 (верхняя грань с условием симметрии не показана). На самой модели судна установлено граничное условие стенки с логарифмическим законом для скорости.

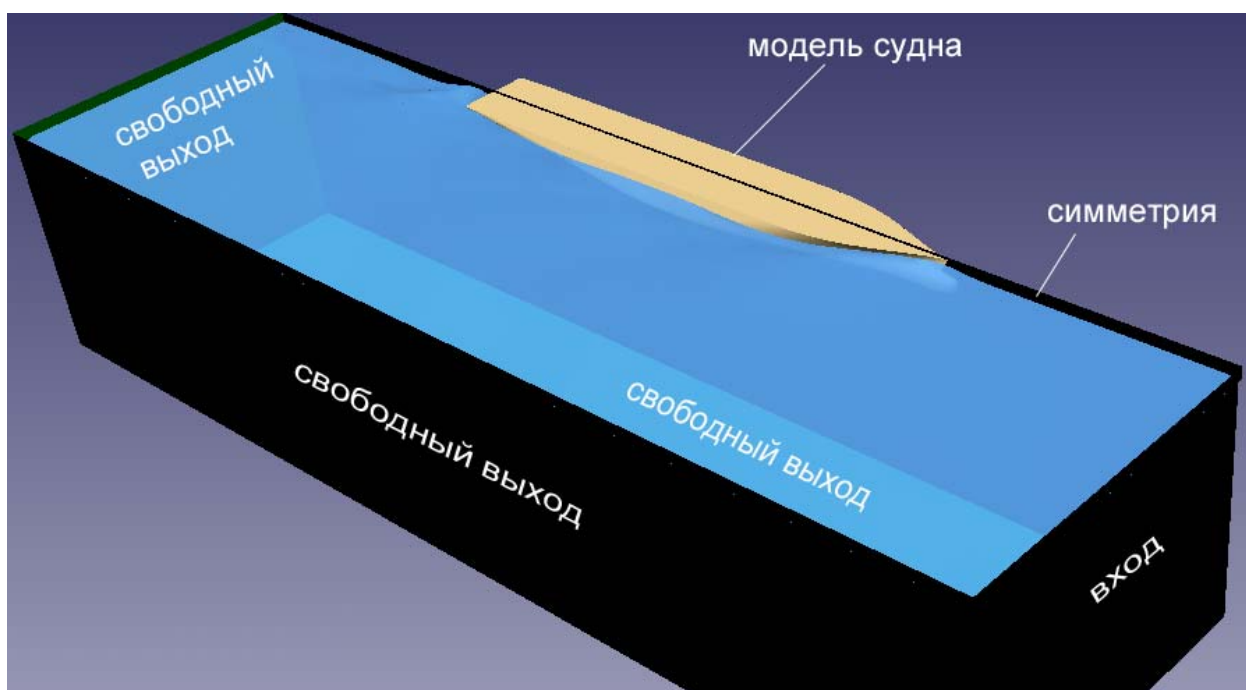


Рис. 3. Общий вид расчетной области с моделью судна

Расчетной области назначена модель течения со свободной поверхностью, задан невозмущенный уровень жидкости, скорость жидкости на входе и другие физические величины и постоянные, необходимые для корректного функционирования расчетной

модели. При этом, как и в условиях эксперимента, в качестве жидкости, обтекающей судна, принята пресная чистая вода. Модель течения со свободной поверхностью реализована в комплексе “Flow Vision” на основе модели течения несжимаемой жидкости и включает следующие уравнения гидродинамики (согласно [4]).

Уравнение Навье-Стокса с учетом турбулентной вязкости в форме, предложенной Рейнольдсом:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \nabla(V \otimes V) = -\frac{\nabla P}{\rho} + \frac{1}{\rho} \nabla((\mu + \mu_t)(\nabla V + (\nabla V)^T))$$

Уравнение неразрывности:

$$\nabla V = 0$$

Выражение для турбулентной вязкости в рамках к-ε модели турбулентности:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{\kappa^2}{\varepsilon} f_\mu$$

Выражения для турбулентной энергии κ и параметра ее диссипации ε :

$$\frac{\partial \kappa}{\partial t} + \nabla(V\kappa) = \frac{1}{\rho} \nabla \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \nabla \kappa \right) + \frac{G}{\rho} - (\varepsilon - \varepsilon_{ini}) - F$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \nabla(V\varepsilon) = \frac{1}{\rho} \nabla \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + \frac{\varepsilon}{\kappa} \left(C_1 \frac{G}{\rho} - C_2 f_1 (\varepsilon - \varepsilon_{ini}) \right), \text{ где:}$$

ε_{ini} - начальное значение параметра (скорости) диссипации турбулентной энергии;

$$G = \mu_{eff} \frac{\partial V_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right);$$

$\sigma_\kappa = 1$, $\sigma_\varepsilon = 1$, $C_\mu = 0.09$, $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$ - эмпирические параметры модели.

Исходя из того, что при обтекании натурного судна числа Рейнольдса достигают больших значений, в расчетной области была принята стандартная модель турбулентности, согласно которой:

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t, f_1 = 1, f_\mu = 1, F = 0.$$

В принятой модели изменения свободной поверхности отслеживаются с помощью переменной VoF (Volume of Fluid), которая в расчетных уравнениях обозначается буквой F. В областях, полностью занятых жидкостью, значение этой переменной равно единице, в областях, полностью занятых газом, - нулю. На границе раздела двух фаз в каждой расчетной ячейке определяется доля объема, занятого жидкостью и газом. Свободная поверхность в этом случае соответствует значению переменной $F = 0.5$. Уравнение переноса функции заполнения записывается в виде:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + V \nabla F = 0$$

Расчетная сетка формировалась на основе первоначального грубого разбиения расчетной области с последующим автоматическим адаптивным измельчением первого уровня по поверхности корпуса судна. Комплекс “Flow Vision” позволяет создавать прямоугольную расчетную сетку, высокое качество разрешения геометрии достигается с помощью технологии подсеточного разрешения геометрии и адаптивного локального измельчения по граничным условиям. Начальная сетка сформирована с учетом формы

модели судна, необходимости обеспечить высокую плотность сетки в районе свободной поверхности, условий демпфирования корабельных волн у дальних стенок расчетной области и многих других факторов (рис. 4).

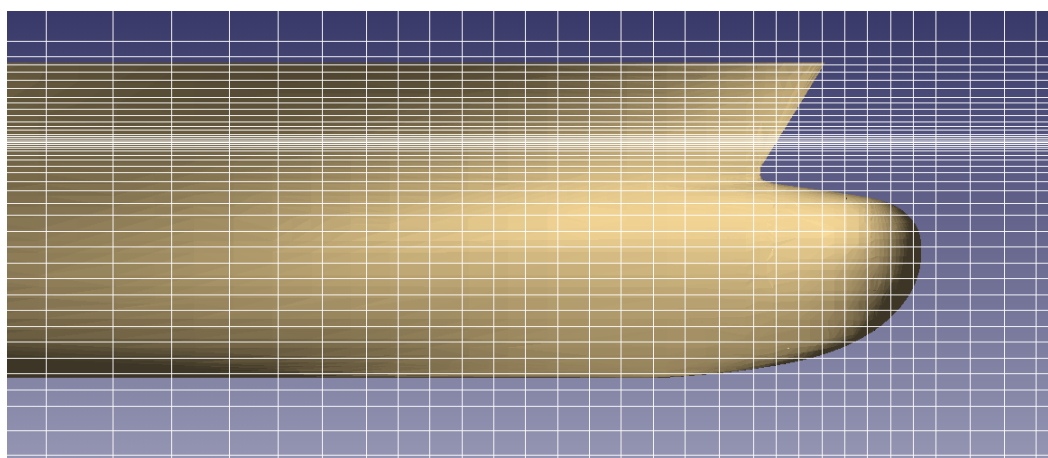


Рис. 4. Начальное разбиение расчетной сетки

Важным моментом при подготовке расчетов также оказался выбор закрепленной или свободной модели судна. При закрепленной модели изменения посадки на ходу за счет действия гидродинамических сил не учитываются, судно обтекается как неподвижное тело. При задании веса судна, его момента инерции относительно поперечной горизонтальной оси, а также степеней свободы перемещения вдоль вертикальной оси и вращения вокруг поперечной горизонтальной оси модель судна становится «свободной», то есть может изменять свою посадку под действием гидродинамических сил, что отражается на силе сопротивления, если движение происходит с достаточно высокой относительной скоростью. Поскольку испытания моделей судов в опытовых бассейнах проводят в «свободном» режиме, этот режим предпочтительнее использовать в расчетах. Однако на практике введение степеней свободы значительно усложняет расчетный вариант и требует высоких затрат компьютерных ресурсов. Для проверки влияния изменения посадки судна на силу сопротивления было выполнено несколько расчетов для проектной скорости судна 24 узла, а именно: расчет с закрепленной моделью с нулевым погружением и дифферентом; расчет с закрепленной моделью со значениями погружения и дифферента, замеренными в ходе модельных испытаний; расчет с назначенными степенями свободы. Результаты всех трех расчетов не показали заметных различий силы сопротивления судна, очевидно, ввиду малых изменений посадки судна в данном скоростном режиме.

Рассмотрим результаты расчетов в сопоставлении с данными эксперимента в безразмерной форме, в виде зависимости коэффициента остаточного сопротивления от числа Фруда (рис. 5).

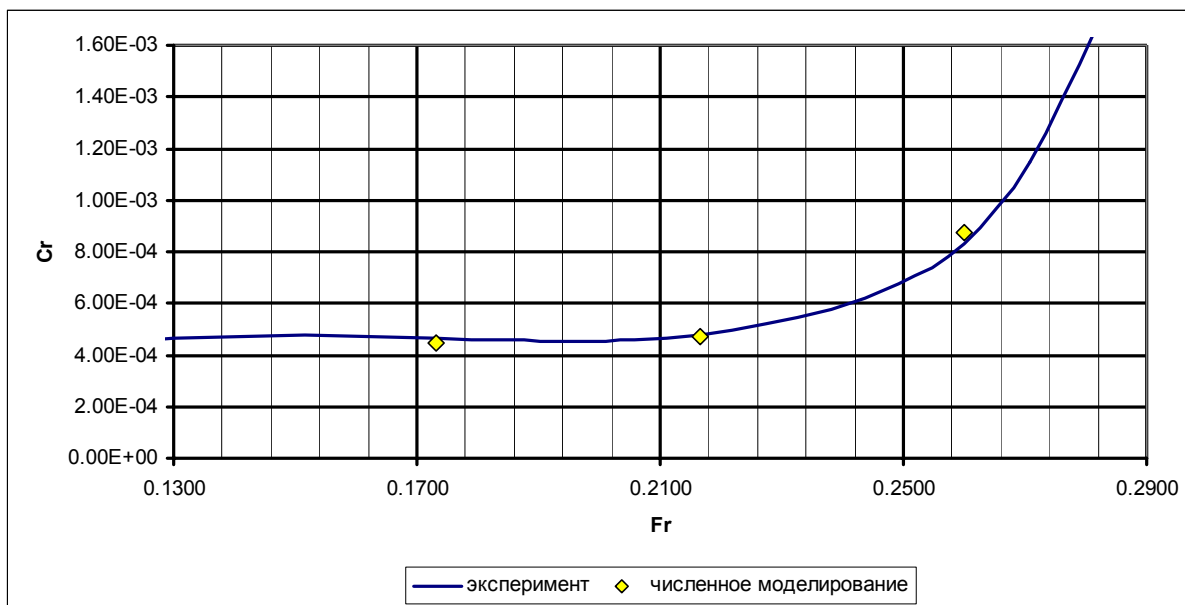


Рис. 5

На рисунке 6 представлены результаты численных расчетов и эксперимента в размерной форме, в виде зависимости полного сопротивления судна от его скорости. Для сравнения на рисунке также представлены результаты расчета сопротивления судна с помощью эмпирического метода Холтропа – Меннена [7], который часто применяют для оценки сопротивления торговых судов на ранних стадиях проектирования.

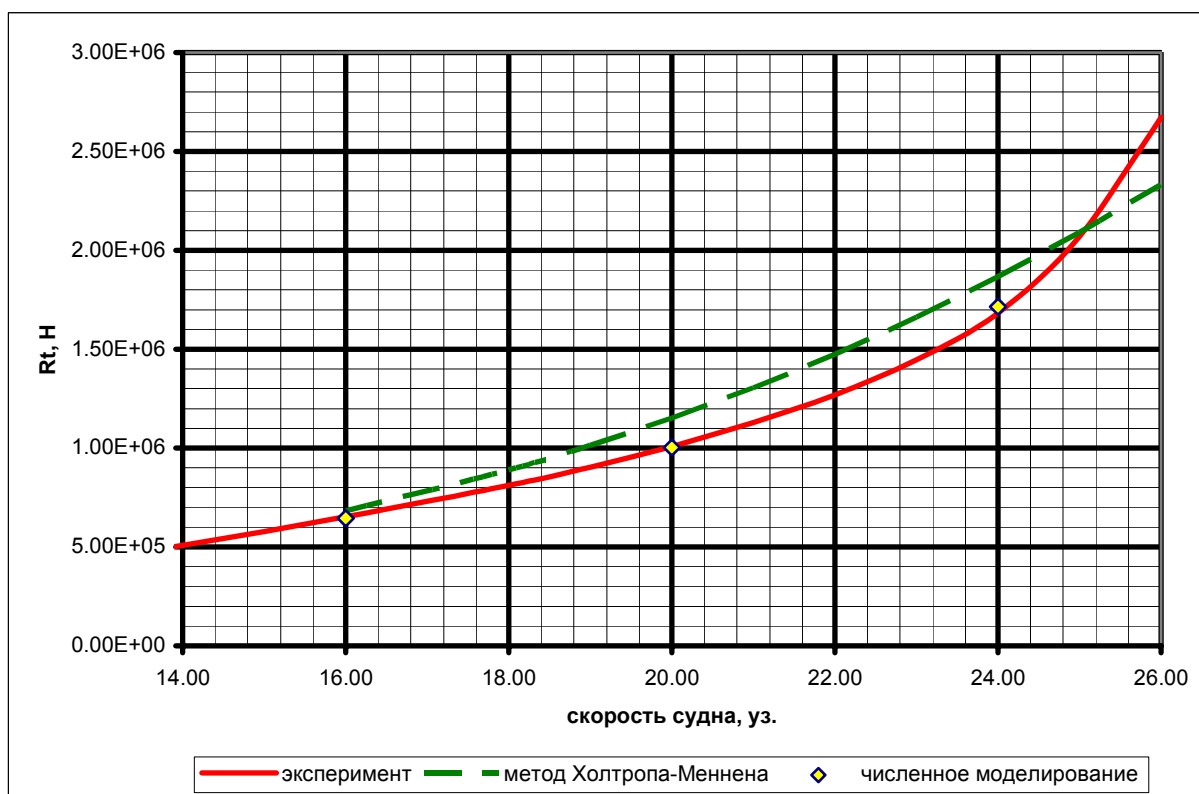


Рис. 6

Рассмотрим сопоставление некоторых физических картин обтекания корпуса судна, полученных экспериментально и в результате численного моделирования.

Волновой профиль при скорости 24 узла ($Fr = 0.26$) – рис. 7

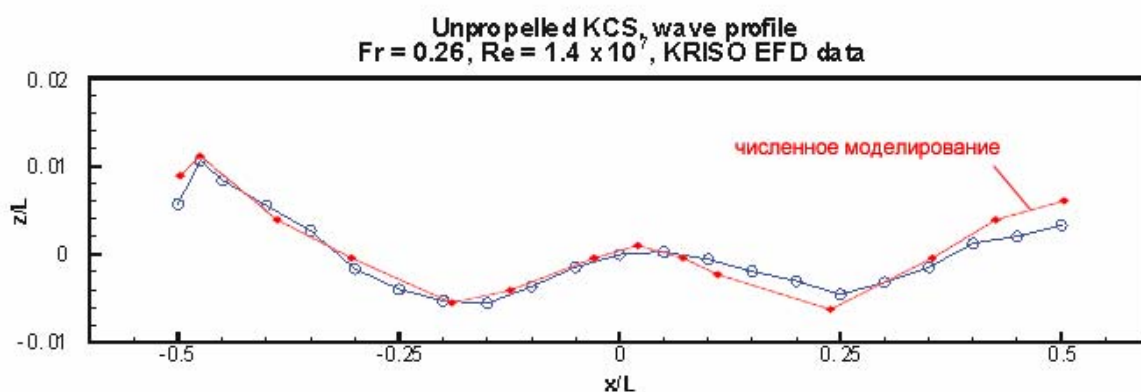
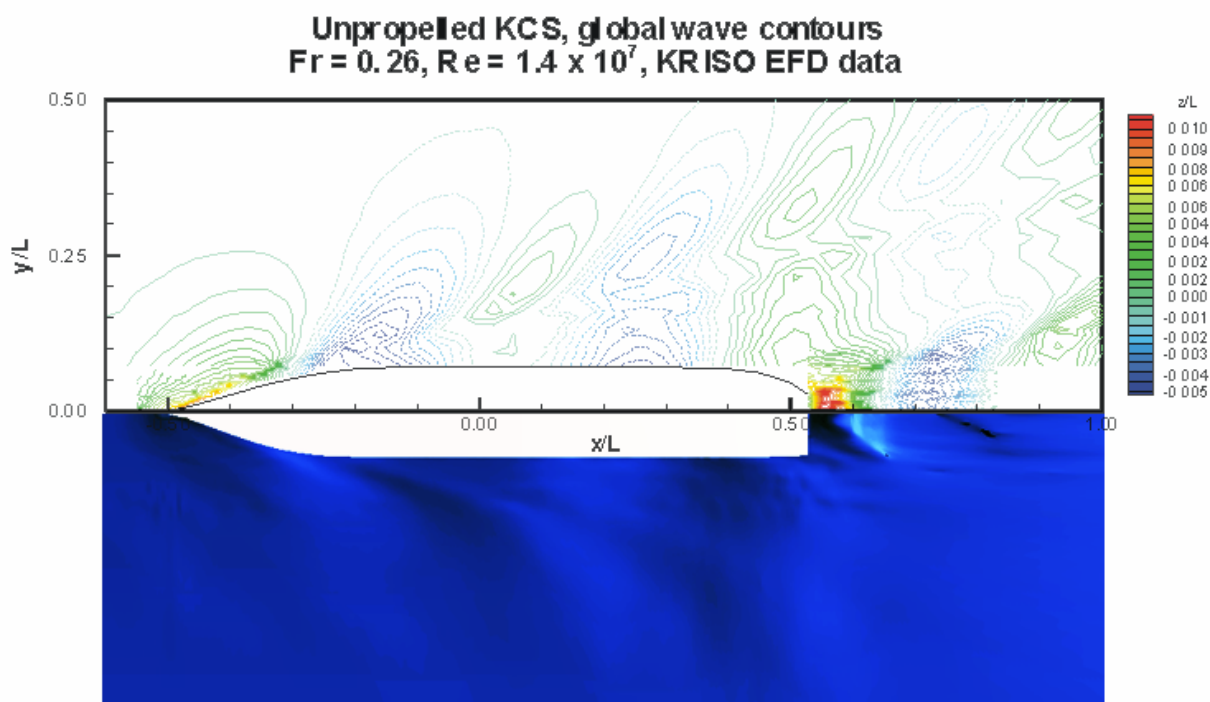


Рис. 7

Общая волновая структура судна при скорости 24 узла ($Fr = 0.26$) – рис. 8



численное моделирование

Рис. 8

Следует отметить, что численное моделирование обтекания судна позволяет получить гораздо более полную наглядную информацию о характеристиках потока, чем эксперимент даже в наиболее современных и хорошо оснащенных исследовательских центрах. Поэтому помимо тех картин обтекания, которые приведены выше для сопоставления с экспериментом, рассмотрим в качестве примеров некоторые другие, в отношении которых экспериментальные данные отсутствуют.

Распределение динамического давления (за вычетом гидростатического) по погруженной поверхности корпуса судна при скорости 24 узла ($Fr = 0.26$) – рис. 9.

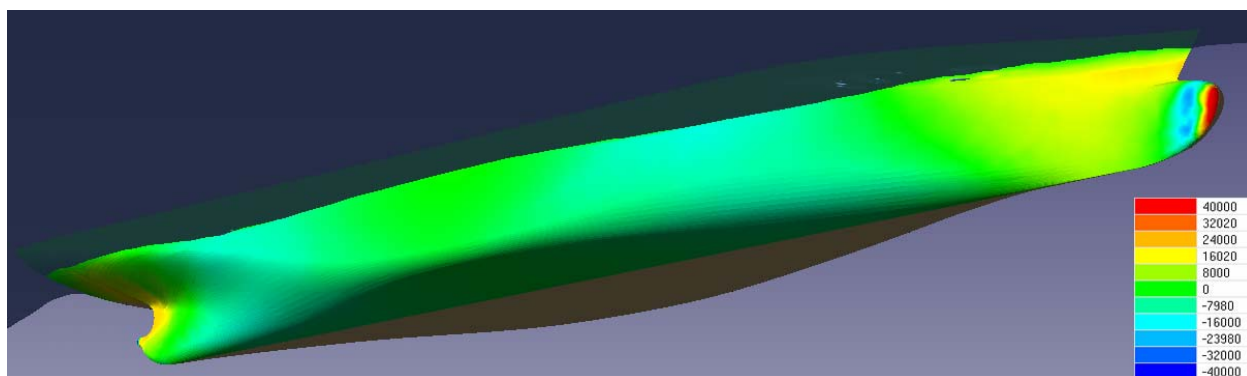


Рис. 9

Линии тока по поверхности корпуса судна при скорости 24 узла ($Fr = 0.26$) – рис. 10.

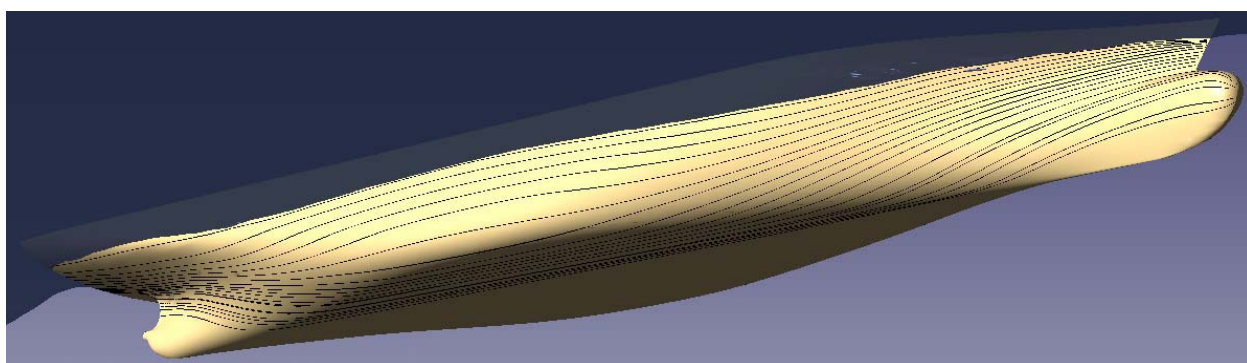


Рис. 10

Перспективное изображение свободной поверхности жидкости, вид с кормового курсового угла при скорости 24 узла ($Fr = 0.26$) – рис. 11.

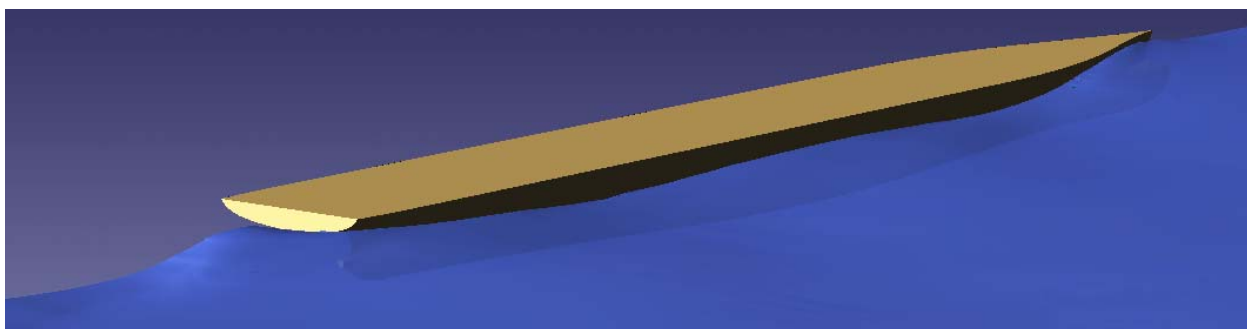


Рис. 11

Перспективное изображение свободной поверхности жидкости, вид с носового курсового угла при скорости 24 узла ($Fr = 0.26$) – рис. 12.

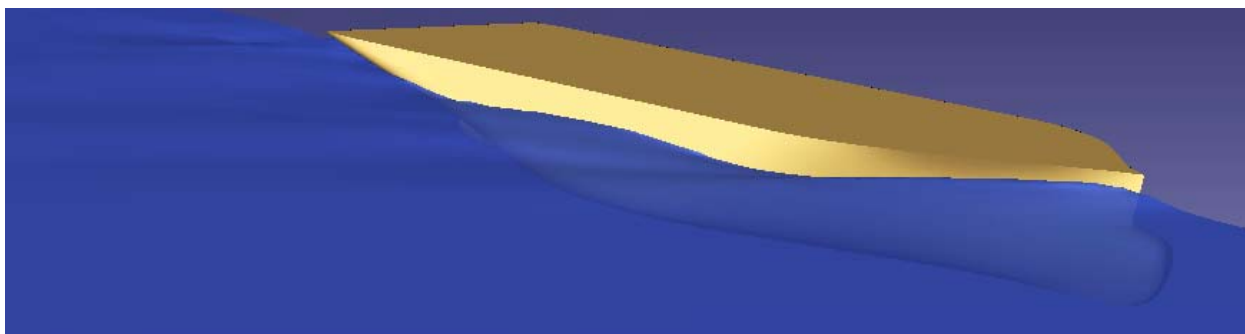


Рис. 12

Литература

1. <http://www.nmri.go.jp/cfd/cfdws05/gothenburg2000/KCS/container.html>
2. А.М. Басин, В.Н. Анфимов. Гидродинамика судна. Л.: Речной транспорт, 1961.
3. Справочник по теории корабля: В трех томах. Том 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые двигатели/ Под ред. Я.И. Войткунского. Л.: Судостроение, 1985.
4. Система моделирования движения жидкости и газа FlowVision. Руководство пользователя. Москва, ООО «ТЕСИС», 2001.
5. П.А. Апухтин, Я.И. Войткунский. Сопротивление воды движению судов. Л.: МАШГИЗ, 1953.
6. H. Schneekluth and V. Bertram. Ship Design for Efficiency and Economy. Butterworth und Heinemann. Second Edition. 1998.
7. Holtrop J., Mennen G.G.J. An Approximate Power Prediction Method. ISP, Vol. 29, No. 335, 1982.
8. А.А. Костюков. Сопротивление воды движению судов. Л.: Судостроение, 1966.