

УДК: 532: 629.5.016

Эталонное тестирование ПК FlowVision в задаче моделирования обтекания судна

А. В. Печенюк

Digital Marine Technology,
Украина, 65062, г. Одесса, Аркадиевский переулок, д. 4, офис 1

E-mail: andrew@digitalmarine.net

Получено 17 июня 2014 г.

В области судостроения наиболее авторитетные рекомендации по тестированию и аттестации численных методов были выработаны в рамках международного семинара по проблемам численного моделирования обтекания судового корпуса вязким потоком, который раз в пять лет проходит поочередно в Гетеборге (Швеция) и Токио (Япония). На семинаре «Гетеборг–2000» были предложены три судовых корпуса с современной формой обводов, снабженные надежными экспериментальными данными. Среди них наиболее общий случай представляет контейнеровоз KCS — судно средней быстроходности с умеренной полнотой обводов. В работе изложены результаты численного исследования обтекания корпуса KCS с помощью ПК FlowVision, выполненного согласно стандартным процедурам семинара. Полученные результаты сопоставлены с данными эксперимента и результатами расчетов в других ведущих ПК.

Ключевые слова: численное моделирование буксировки, тестирование численных методов

Benchmarking of CEA FlowVision in ship flow simulation

A. V. Pechenyuk

Digital Marine Technology, 4 Arcadievskiy lane, office 1 Odessa, 65062, Ukraine

Abstract. — In the field of naval architecture the most competent recommendations in verification and validation of the numerical methods were developed within an international workshop on the numerical prediction of ship viscous flow which is held every five years in Gothenburg (Sweden) and Tokyo (Japan) alternately. In the workshop “Gothenburg–2000” three modern hull forms with reliable experimental data were introduced as test cases. The most general case among them is a containership KCS, a ship of moderate specific speed and fullness. The paper focuses on a numerical research of KCS hull flow, which was made according to the formal procedures of the workshop with the help of CEA FlowVision. Findings were compared with experimental data and computational data of other key CEA.

Keywords: numerical towing test, verification of numerical methods

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2014, vol. 6, no. 6, pp. 889–899 (Russian).

© 2014 Андрей Владимирович Печенюк

Введение

Численные методы гидродинамики начали широко применяться в судостроительных задачах отработки обводов и исследования ходкости сравнительно недавно, благодаря развитию мощной вычислительной техники. Численный подход по сравнению с лабораторным экспериментом предоставляет проектанту большой объем информации в визуальной форме: распределение давления и линии тока на поверхности корпуса, распределение скоростей и давлений в объеме воды и многие другие характеристики. С помощью численного моделирования есть надежда преодолеть проблему согласования чисел Fn и Rn в натурном масштабе, чего невозможно достичь с помощью модельного эксперимента.

Все это делает численный подход перспективным. Однако для него еще не успели сложиться общепризнанные методики подготовки и выполнения расчетов. Модельный эксперимент базируется на прозрачных принципах теории подобия, численный подход же требует задания большого числа параметров, многие из которых могут влиять на результаты.

Поэтому большую роль в развитии численных методов для промышленных приложений приобрели процедуры тестирования (англ. *verification*) и аттестации (англ. *validation*). В области судостроения авторитетные рекомендации по тестированию и аттестации численных методов были выработаны в рамках международного семинара по проблемам численного моделирования обтекания судового корпуса вязким потоком, который раз в пять лет проходит поочередно в Гетеборге (Швеция) и Токио (Япония).

На семинаре «Гетеборг–2000» в качестве эталонных тестов были предложены три судовых корпуса с современной формой обводов, снабженные надежными экспериментальными данными. Геометрия корпусов в виде 3D моделей и результаты буксировочных модельных испытаний, включая некоторые образцы визуализации потока, были опубликованы в открытых источниках [Larsson, Stern, Bertram, 2003].

Рекомендованные для тестирования суда — танкер, контейнеровоз и боевой корабль — по типу обводов и скоростному режиму относятся к разным группам, что позволяет охватить весь спектр явлений, сопровождающих обтекание судовых корпусов. Наиболее общий случай представляет контейнеровоз KCS (от англ. *Korean container ship*) — судно средней быстроходности с умеренной полнотой обводов. При обтекании KCS основную роль играют процессы формирования корабельных волн, что хорошо отвечает принципам, на которых основана методика проведения модельных испытаний и пересчета результатов на натуру.

В работе представлены результаты численного моделирования буксировки KCS, выполненного в соответствии с правилами и рекомендациями семинара в программном комплексе (ПК) FlowVision. Расчеты были выполнены в 2013 г. в версии ПК 3.08.04. Полученные результаты сопоставлены с экспериментальными данными, а также с результатами других ПК, которые были опубликованы участниками последнего семинара в 2010 году [Larsson, Stern, Visonneau, 2011].

Объект исследования

Корпус KCS был спроектирован в Корейском исследовательском институте судов и океанотехники (MOERI, ранее KRISO) в 1997 году специально для тестирования вычислительных методов. В основу задания на проектирование была положена концепция магистрального контейнеровоза для тихоокеанских контейнерных линий.

Носовая часть судна бульбообразная, кормовая часть — транцевая традиционного типа, рассчитанная на установку одновального движительного комплекса.

Основные элементы теоретического чертежа (главные размерения) в масштабах модели и натуре представлены в таблице 1. Эскиз обводов представлен на рисунке 1.

Таблица 1

Элементы теоретического чертежа	Натура	Модель (31.6 : 1)
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 объёмное V , м ³	52030.0	1.6490
Площадь смоченной поверхности S , м ²	9424.0	9.4379
Коэффициент общей полноты C_B	0.6505	
Коэффициент полноты мидель-шпангоута C_M	0.9849	
Относительная абсцисса центра величины x_C/L_{BP} (%), в нос «+»	-1.48	

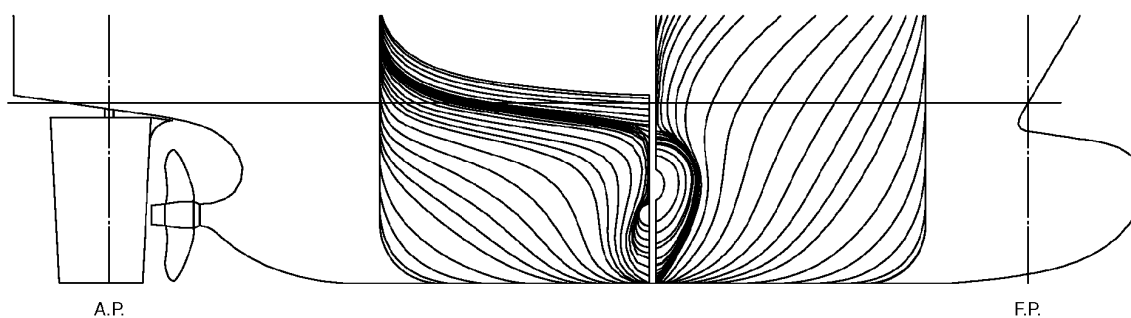


Рис. 1

В опытовом бассейне MOERI были выполнены буксировочные испытания, в результате которых получены данные по сопротивлению, параметрам ходовой посадки и локальным характеристикам потока. Также были выполнены самоходные испытания, которые послужили базой для соответствующих тестовых задач. В настоящей работе рассмотрены только задачи, связанные с буксировкой модели голого корпуса. Согласно рекомендациям семинара, численное моделирование было выполнено в масштабе модели.

Особенности физической модели

Модель несжимаемой жидкости со свободной поверхностью

В настоящем исследовании использовалась модель несжимаемой жидкости на основе уравнений Рейнольдса, которая в настоящее время чаще всего применяется в задачах подобного класса. Уравнение Рейнольдса, как известно, имеет следующий вид:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \nabla(V \otimes V) = -\frac{\nabla P}{\rho} + \frac{1}{\rho} \nabla \left((\mu + \mu_t) (\nabla V + (\nabla V)^T) \right). \quad (1.1)$$

Уравнение (1.1) дополняется обычным уравнением неразрывности.

Для моделирования свободной поверхности в ПК FlowVision реализован модифицированный метод VoF (от англ. Volume of Fluid). В методе VoF используется функция заполнения F . В ячейках сетки, полностью занятых жидкостью, $F = 1$; в ячейках, полностью занятых газом,

$F = 0$. Граница раздела фаз соответствует значению $F = 0.5$. Уравнение переноса имеет вид:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + V \nabla F = 0. \quad (1.2)$$

Моделирование турбулентности

Значительное упрощение, которое дает уравнение Рейнольдса (1.1) вместо классического уравнения Навье–Стокса, подразумевает расчет величин турбулентной вязкости μ_t . Для этого применяются модели турбулентности разной сложности: однопараметрические, двухпараметрические линейные и квадратичные, анизотропные и т. д.

В задачах обтекания судового корпуса чаще всего используются линейные двухпараметрические модели. В настоящей работе также использовалась модель этого типа — стандартная k - ε модель, согласно которой:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (1.3)$$

Величины турбулентной энергии k и скорости ее диссипации ε определяются согласно выражениям:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla(V_k) = \frac{1}{\rho} \nabla((\mu + \mu_t) \nabla k) + \frac{G}{\rho} - (\varepsilon - \varepsilon_{\text{ini}}), \quad (1.4)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \nabla(V_\varepsilon) = \frac{1}{\rho} \nabla((\mu + \mu_t) \nabla \varepsilon) + \frac{\varepsilon}{k} \left(C_1 \frac{G}{\rho} - C_2 (\varepsilon - \varepsilon_{\text{ini}}) \right). \quad (1.5)$$

Стандартная k - ε модель считается относительно простой и хорошо изученной, ее преимущество заключается в стабильной и адекватной работе на сетках, имеющих большой разброс размеров ячеек. В условиях безотрывного обтекания, при полностью турбулентном режиме пограничного слоя (ПС) использование k - ε модели, как правило, позволяет получать хорошие результаты.

Моделирование свободной посадки

Часть экспериментальных результатов была получена по модели со свободной посадкой, которая могла менять свое положение относительно поверхности воды под действием гидродинамических сил. Для обеспечения соответствующих условий в численных расчетах использовалась технология фильтра подвижного тела ПК FlowVision.

Технология подвижного тела реализует модель тела с шестью степенями свободы, заданного геометрическим объектом. При моделировании свободной посадки в буксировочном испытании используется две степени свободы: движения вдоль вертикальной оси и вращения вокруг поперечной горизонтальной оси.

Важная особенность данной технологии заключается в необходимости перестроения расчетной сетки на каждой итерации. Несмотря на дополнительные затраты вычислительных ресурсов, обеспечивается достаточно высокая эффективность за счет использования в ПК FlowVision прямоугольной адаптивной локально измельченной сетки (АЛИС) [Aksenov, Dyadkin, Pokhilko, 1998].

Постановка задачи

Расчетная область, начальные и граничные условия

Моделирование буксировочных испытаний судов численными методами рационально выполнять по схеме гидротка, в котором модель судна обтекается обращенным потоком жидко-

сти. Это обеспечивает близкое к постоянному относительное положение расчетной области с сеткой и объекта исследования, что позволяет использовать сравнительно небольшую расчетную область. Критерием для выбора ее минимальных размеров является отсутствие влияния границ на получаемые результаты.

Геометрия расчетной области в исследовании представляла собой прямоугольный параллелепипед, разбитый на грани в соответствии со схемой расстановки граничных условий (ГУ) — рисунок 2. Так как обводы корпуса симметричны, моделировалась половина потока.

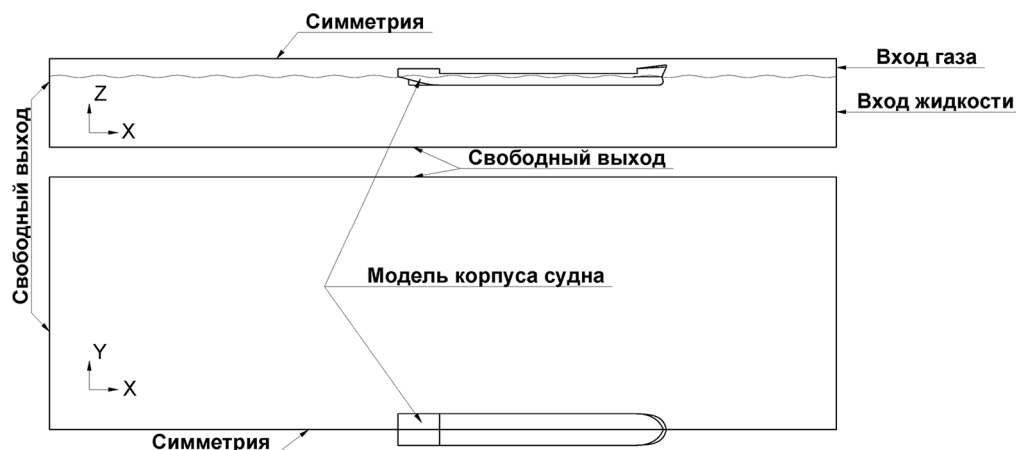


Рис. 2

Модель корпуса была загружена в расчет как отдельный геометрический объект, на основе которого был создан модификатор подвижного тела. В расчетах, где требовалось моделировать свободную посадку, подвижному телу были назначены две нужные степени свободы и соответствующие им массово-инерционные характеристики. На поверхности модификатора было установлено ГУ стенки с логарифмическим законом для скорости, которое хорошо отвечает полностью развитому турбулентному ПС (при испытаниях моделей судов используются методы искусственной идентификации потока — турбулизаторы).

Исходными данными в расчетах являлись: ускорение силы тяжести, скорость буксировки, плотность и вязкость воды.

Расчетная сетка

Технология АЛИС сводит формирование расчетной сетки к построению начальной сетки и, при необходимости, заданию зон локального измельчения (адаптации) в объемах и на поверхностях. Наиболее сложная и трудоемкая часть работы, связанная с построением ячеек, которые соприкасаются с ГУ на поверхностях, выполняется автоматически.

Расчетная сетка для моделирования обтекания судна строится на основе прямоугольной неравномерной начальной сетки. Неравномерность размеров ячеек используется для лучшего разрешения важных участков потока. Наиболее мелкие ячейки начальной сетки выгодно группировать у оконечностей судна, где наблюдаются максимальные перепады давления, а также в районе свободной поверхности, где формируется система корабельных волн. Сетка, которая использовалась в исследовании, показана на рисунке 3. Внутри бокса адаптации каждая ячейка была дополнительно разбита на восемь равных частей (первый уровень адаптации).

Выбор параметров расчетной сетки, обеспечивающих баланс между точностью и затратами вычислительных ресурсов, представляет собой одну из краеугольных проблем. При наличии опыта параметры сетки можно успешно выбирать, ориентируясь на особенности геометрической формы объектов. В идеале материалом для выбора параметров сетки являются особенности разрешаемого потока, которые связаны с геометрией объекта, но связь эта бывает сложной

и нелинейной. Поэтому в ответственных случаях применяется проверка сходимости по сетке, то есть опытная проверка влияния параметров сетки на точность результатов.

В исследовании проверка сходимости по сетке показала достаточно высокую требовательность задачи к вычислительным ресурсам. Пример зависимости сопротивления от числа расчетных ячеек для одной из расчетных скоростей показан на рисунке 4.

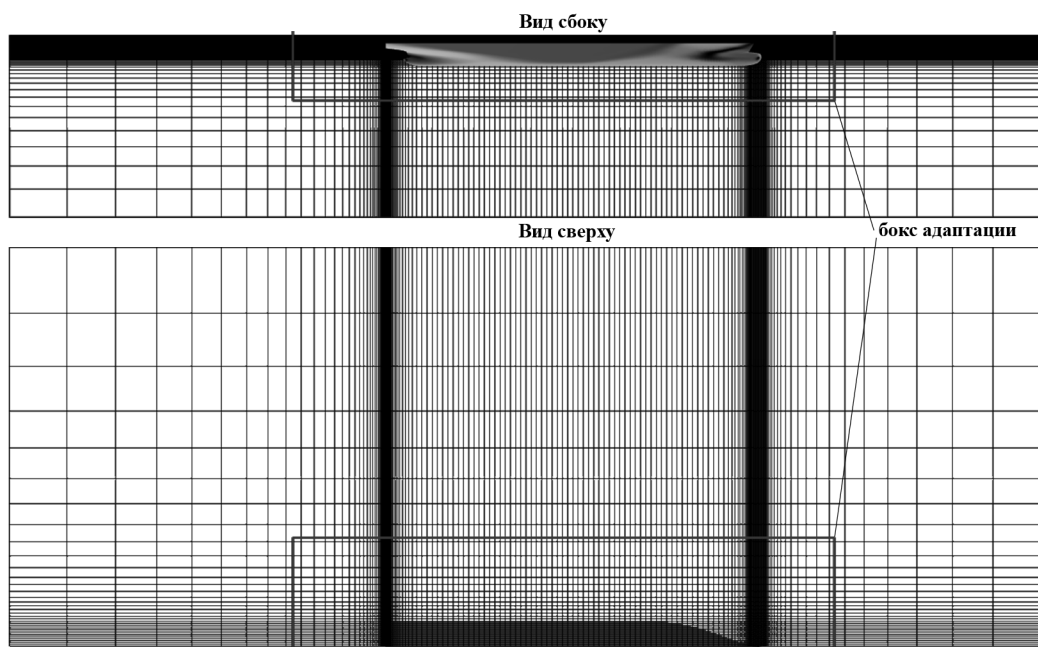


Рис. 3

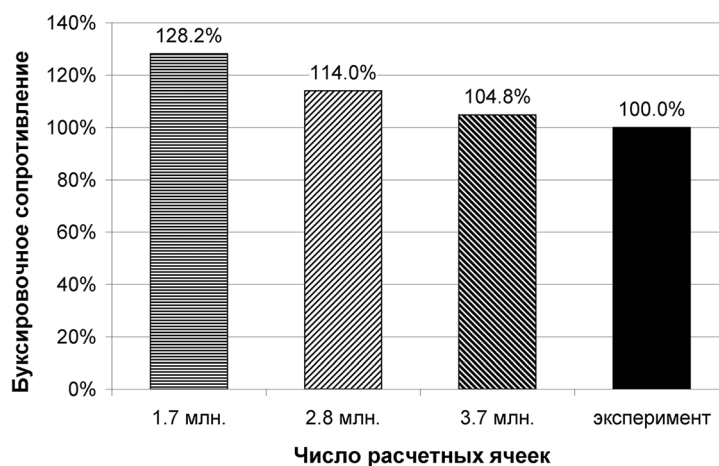


Рис. 4

Вычислительные ресурсы

В задачах со свободной поверхностью использование сеток с числом расчетных ячеек порядка 3–4 млн. обуславливает высокие требования к вычислительным ресурсам. Выполнение расчетов в практически приемлемые сроки становится возможным только за счет параллельных вычислений на суперкомпьютерах. В настоящем исследовании использовались ресурсы высокопроизводительных кластеров НИЦ «Курчатовский институт».

Результаты по модели, закрепленной в статическом положении (случаи 2.1 и 2.2а)

По модели KCS, закрепленной в статическом положении, предусмотрены две тестовые задачи: 2.1 — сравнение визуальной информации по волновой системе и скоростям в потоке, и 2.2а — сравнение величин буксировочного сопротивления.

Сравнение визуальной информации в форме, принятой в задаче 2.1, для волновых профилей на поверхности корпуса представлено на рисунке 5, для линий равных уровней свободной поверхности — на рисунке 6.

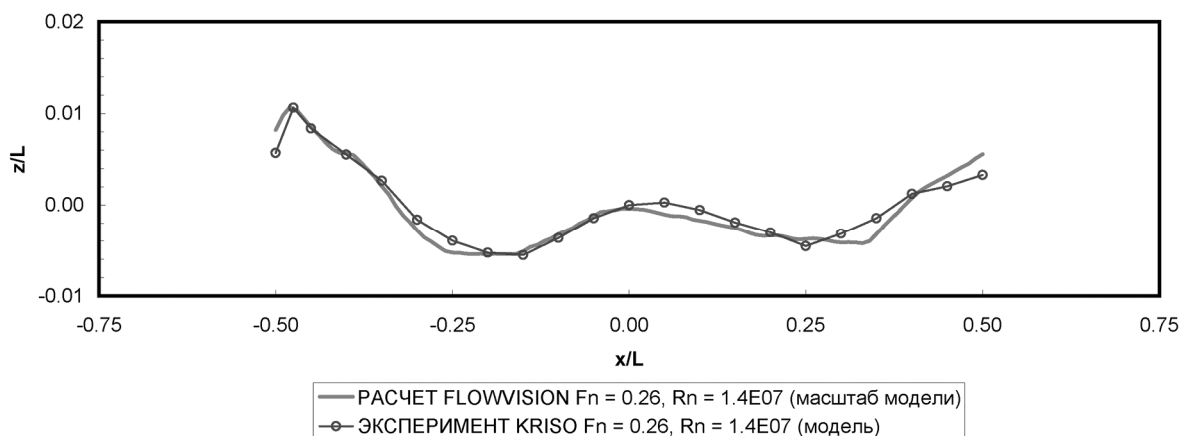


Рис. 5

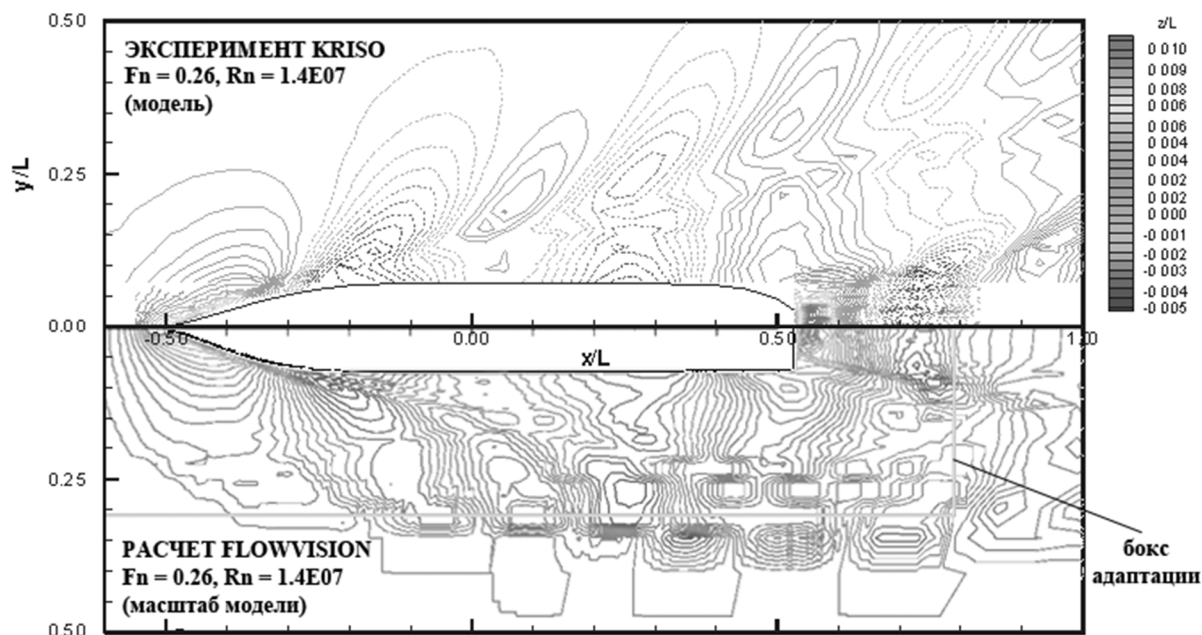


Рис. 6

Расчетные данные на рисунке 5 в целом хорошо совпадают с экспериментальными, хотя имеются разнонаправленные местные расхождения.

На рисунке 6 можно видеть хорошее совпадение вблизи модели судна, но большие расхождения на удалении от нее. Эти расхождения объясняются, прежде всего, ограниченной зоной

адаптации сетки вокруг модели. На границе бокса адаптации, которая показана на рисунках 3 и 6, из-за скачка в размерах соседних ячеек в моделируемый поток вносятся существенные возмущения. Несмотря на эти несоответствия, сетка, ориентированная на разрешение потока вблизи модели, позволяет получить высокую точность по буксировочному сопротивлению. Результаты по буксировочному сопротивлению в виде коэффициентов остаточного сопротивления C_R и полного сопротивления C_T при $Fn = 0.26$ представлены в таблице 2.

Таблица 2

Эксперимент KRISO		Расчет FlowVision		Расхождение в C_T , %
$C_R \cdot 10^3$	$C_T \cdot 10^3$	$C_R \cdot 10^3$	$C_T \cdot 10^3$	Е
0.7294	3.5600	0.7549	3.5855	+0.7%

Результаты по модели со свободной посадкой (случай 2.2b)

Результаты сравнения данных по буксировочному сопротивлению и параметрам ходовой посадки в широком диапазоне скоростей буксировки (случай 2.2b) представлены в таблице 3, а также в графической форме на рисунках 7 и 8.

Таблица 3

Число Фруда	Эксперимент KRISO		Расчет FlowVision		Расхождение в C_T , %
Fn	$C_R \cdot 10^3$	$C_T \cdot 10^3$	$C_R \cdot 10^3$	$C_T \cdot 10^3$	Е
0.1733	0.4650	3.4997	0.6169	3.6517	+4.3%
0.1949	0.4500	3.4232	0.7501	3.7233	+8.8%
0.2166	0.4800	3.3998	0.6744	3.5942	+5.7%
0.2382	0.5780	3.4506	0.8214	3.6940	+7.1%
0.2599	0.8320	3.6626	0.9109	3.7415	+2.2%
0.2707	1.1460	3.9572	1.2905	4.1017	+3.7%
0.2816	1.6600	4.4528	1.5880	4.3807	-1.6%
Средняя погрешность					+4.3%

Сравнение показало высокую точность по буксировочному сопротивлению при $Fn > 0.26$ и заметное завышение расчетных данных при низких Fn . Одной из причин завышения представляется особенность расчетной сетки, которая была построена с учетом максимальных амплитуд корабельных волн, наблюдаемых при высоких Fn . Очевидно, что при меньших амплитудах часть подробной сетки не использовалась, и происходило определенное снижение точности расчетов. Для исключения влияния этого фактора необходимо готовить индивидуальную сетку для каждого Fn , что, однако, требует больших затрат времени.

Сложнее объяснить разницу в точности при $Fn = 0.26$ между фиксированной (2.2a) и свободной (2.2b) посадками. В первом случае погрешность составила +0.7 %, во втором +2.2 %. Простое объяснение, связанное с неточностью численного моделирования свободной посадки, было исключено после дополнительной проверки. Проверка заключалась в расчете модели, закрепленной в положении, которое точно соответствует экспериментальным замерам. В результате не было выявлено существенной разницы в величине сопротивления. Очевидно, в данном случае на точность повлияли другие факторы, например, отличия в расчетной сетке вблизи поверхностей моделей из-за их разного положения относительно начальной сетки.

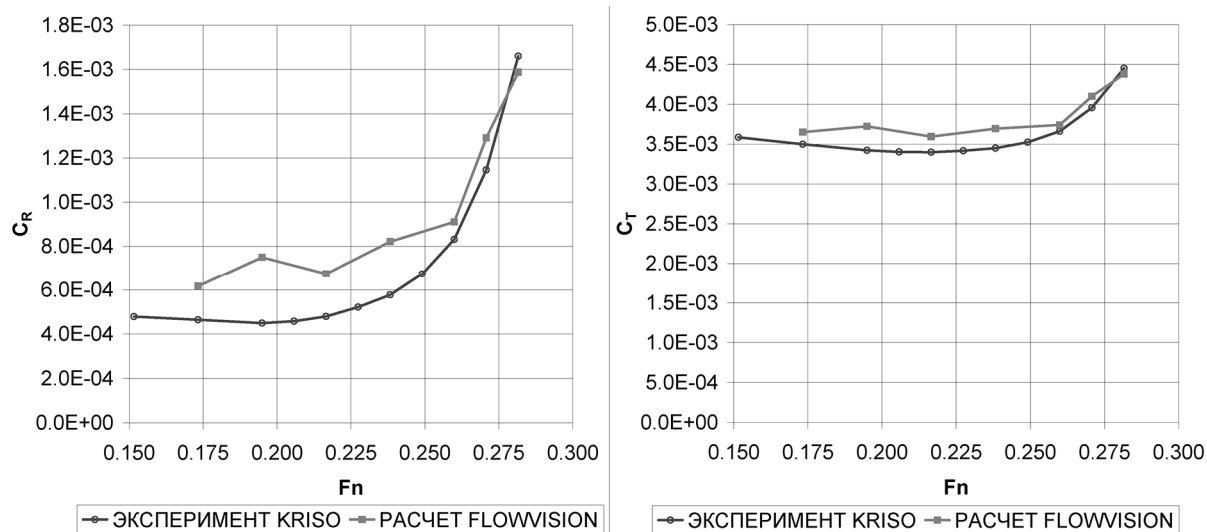


Рис. 7

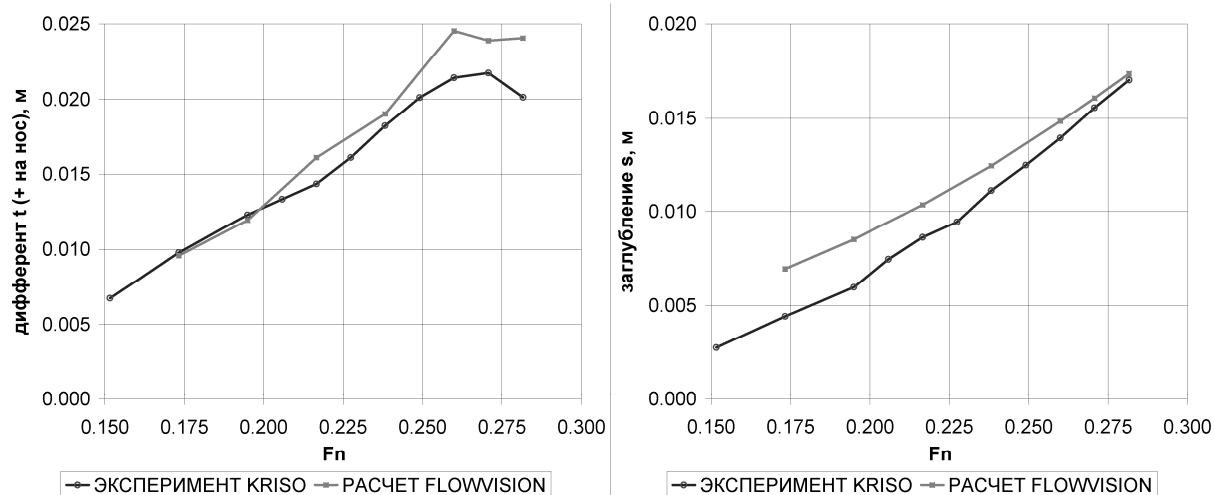


Рис. 8

Результаты, полученные в натурном масштабе

Тестовые задачи семинара предусматривают численное моделирование в модельном масштабе. Однако с практической точки зрения расчеты в натурном масштабе вызывают больший интерес. Как известно, модельные испытания используются для прогнозирования характеристик натуральных объектов. Для этого применяется комплекс процедур пересчета, направленных на устранение несоответствия чисел Rn в разных масштабах (в эксперименте строго соблюдается только F_n), что в отдельных случаях не исключает проявления масштабных эффектов. Численное моделирование в масштабе натурности позволяет с новой стороны взглянуть на вопросы, связанные с масштабным эффектом, и в перспективе отказаться от процедур пересчета.

По этим причинам исследование было дополнено расчетами в натурном масштабе при $F_n = 0.26, 0.27, 0.28$. Для оценки результатов был выполнен пересчет экспериментальных данных на натуру по стандартной методике. Полученное сопоставление представлено в таблице 4.

Как видно из таблицы 4, расхождения между расчетными и экспериментальными значениями коэффициента полного сопротивления C_T в натурном масштабе оказались выше, чем

в модельном. Для всех F_n имеет место завышение расчетных данных по отношению к эксперименту на дополнительные 3–4 %.

Таблица 4

Число Фруда	Эксперимент KRISO (пересчет на натуру)		Расчет FlowVision (масштаб натуре)		Расхождение в C_T , %
F_n	$C_R \cdot 10^3$	$C_T \cdot 10^3$	$C_R \cdot 10^3$	$C_T \cdot 10^3$	E
0.2599	0.8320	2.2094	0.9711	2.3485	+6.3%
0.2707	1.1460	2.5168	1.3321	2.7029	+7.4%
0.2816	1.6600	3.0245	1.7863	3.1509	+4.2%

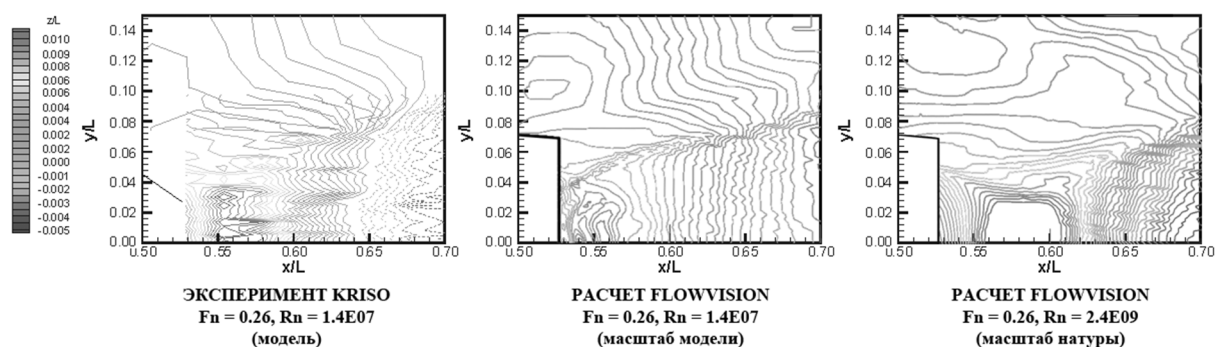


Рис. 9

Анализ особенностей потока показал, что картина течения непосредственно за кормой в разных масштабах существенно различается — рисунок 9. Сложные процессы замыкания кормового транца приводят к разным результатам формирования кормовой волновой системы. Более мощная кормовая волна в масштабе натуре является причиной повышенного сопротивления.

Таким образом, результаты численного моделирования определенно указывают на проявление масштабного эффекта, связанного с разницей в числах R_n . Этот вывод можно признать несколько неожиданным, так как модель KCS имеет обводы, хорошо отвечающие принципам модельного эксперимента и пересчета его результатов, что, очевидно, учитывалось и при выборе ее объектом эталонного тестирования.

Анализ полученных результатов и выводы

Результаты эталонного тестирования ПК FlowVision показали, что при подробных расчетных сетках можно получать вполне адекватные значения буксировочного сопротивления и визуализацию потока вблизи объекта исследования. Относительная погрешность расчетных результатов по отношению к экспериментальным составила +0.7 % для модели, закрепленной в начальном положении (одна точка по F_n), и +4.3 % для модели со свободной посадкой (средняя погрешность по диапазону F_n).

Неопределенность экспериментальных данных по сопротивлению модели KCS согласно специальной оценке [Larsson, Stern, Bertram, 2003] составляет ± 1 %, точность модельного эксперимента в опытовых бассейнах обычно лежит в интервале ± 3 %. Оценка неопределенности численного моделирования является достаточно сложной задачей и в настоящей работе не выполнялась. Судя по относительной погрешности, уровень результатов ПК FlowVision выглядит по сравнению с экспериментом неплохо, особенно с учетом сложности объекта исследования.

Средняя относительная погрешность для модели со свободной посадкой составила +4.3 %, однако больший вклад в нее внесли точки с низкими F_n , в которых коэффициенты остаточного сопротивления C_R по данным эксперимента мало отличаются от постоянного значения.

Участок кривой с постоянными C_R всегда требовал особых усилий в модельном эксперименте и достаточно плохо поддается численному моделированию. Объективная сложность модели KCS заключается в том, что этот участок доходит до необычно больших Fn , что, по-видимому, связано с оптимальной интерференцией элементов волновой системы.

Повышение точности расчетов обтекания KCS при низких Fn является одной из интересных задач для дальнейших исследований. Здесь же отметим, что для точек с $Fn > 0.26$, где зависимость C_R от Fn имеет обычный растущий характер, средняя погрешность составила лишь +1.4 %.

Данные о масштабном эффекте, полученные из расчетов в масштабе натуре, представляют интерес в контексте проблемы прогнозирования сопротивления судна. Согласно этим данным, масштабный эффект у эталонной модели KCS обуславливает появление дополнительных 3–4 % величины сопротивления в натурном масштабе, что заметно превышает неопределенность экспериментальных данных.

Относительные погрешности расчетов в различных ПК по итогам семинара «Гетеборг–2010» и полученные в настоящей работе сопоставлены на рисунке 10. Погрешности по данным семинара показаны для всех тестовых задач (из них более 60 % по модели KCS) в зависимости от числа расчетных ячеек сетки и способа моделирования турбулентности. Как видно из рисунка, полученные в ПК FlowVision погрешности находятся на уровне современных аналогов.

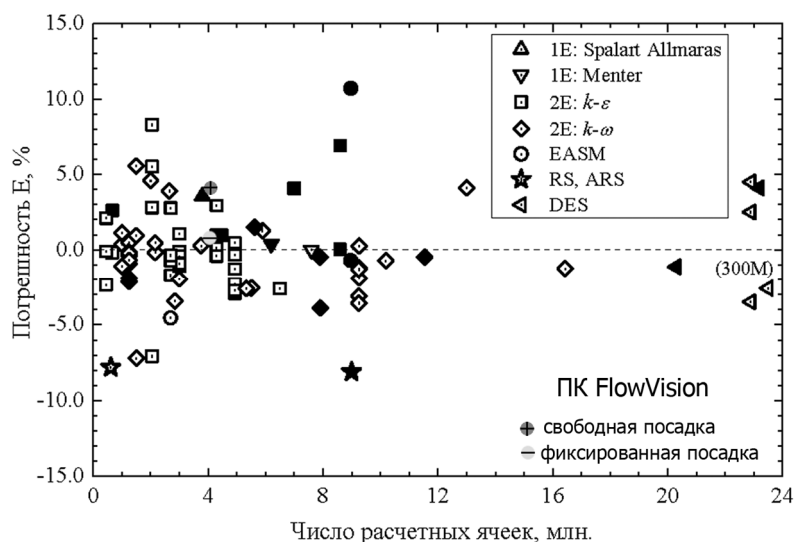


Рис. 10

Список литературы

- Aksenov A., Dyadkin A., Pokhilko V. Overcoming of Barrier between CAD and CFD by Modified Finite Volume Method // Proc 1998 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, San Diego, ASME PVP. — 1998. — Vol. 377–1.
- Larsson L., Stern F. and Bertram V. Benchmarking of computational fluid dynamics for ship flow: the Gothenburg 2000 Workshop // J. Ship Research — 2003. — Vol. 47. — P. 63–81.
- Larsson L., Stern F. and Visonneau M. CFD in ship hydrodynamics — results of the Gothenburg 2010 workshop // Proc. of the IV International Conference on Computational Methods in Marine Engineering — CIMNE — 2011. — Barcelona (Spain), 2011. — P. 17–36.