

## ЭТАЛОННОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ ПК FLOWVISION В ЗАДАЧЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБТЕКАНИЯ СУДОВОГО КОРПУСА

*Печенюк А. В., инженер-кораблестроитель  
Digital Marine Technology, Одесса, Украина*

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  $F_n$  и  $R_n$  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 индустриальных 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 [1].

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 [2].

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 рис. 1, для линий равных уровней свободной поверхности – на рис. 2.

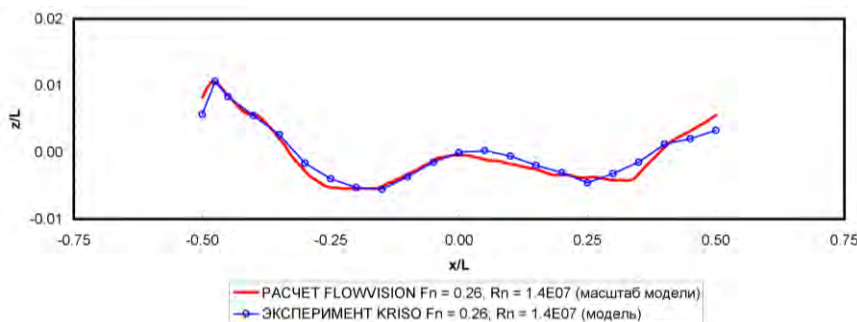


Рис. 1

Расчетные данные на рис. 1 в целом хорошо совпадают с экспериментальными, хотя имеются разнонаправленные местные расхождения.

На рис. 2 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 рисунке, 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  $F_n = 0.26$  представлены в таблице 1.

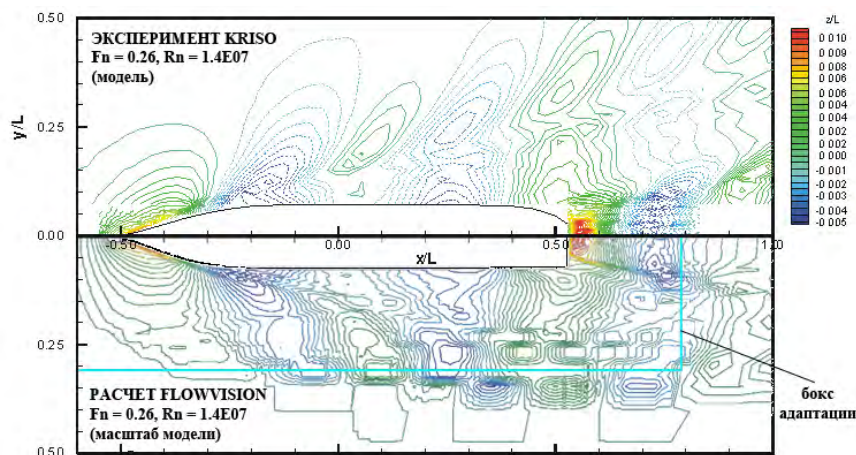


Рис. 2

Таблица 1

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 сравнения данных по буксировочному сопротивлению и параметрам ходовой посадки в широком диапазоне скоростей буксировки (случай 2.2b) представлены в таблице 2, а также в графической форме на рис. 3 и 4.

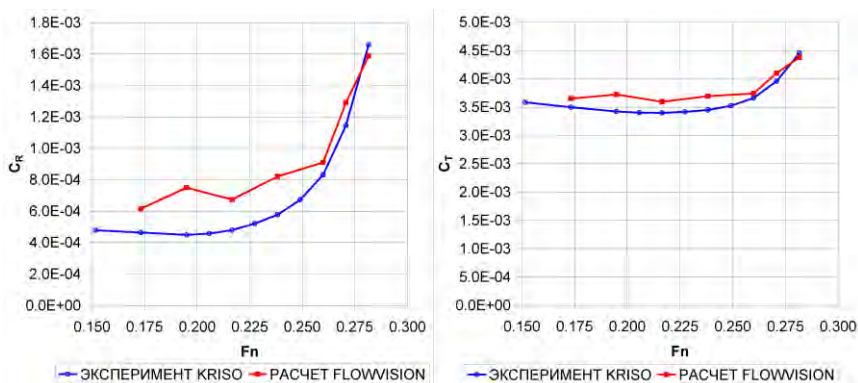


Рис. 3

Таблица 2

Число Фруда	Эксперимент KRISO		Расчет FlowVision		Расхождение в $C_T$ , %
	$C_R \cdot 10^3$	$C_T \cdot 10^3$	$C_R \cdot 10^3$	$C_T \cdot 10^3$	
Fn					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%

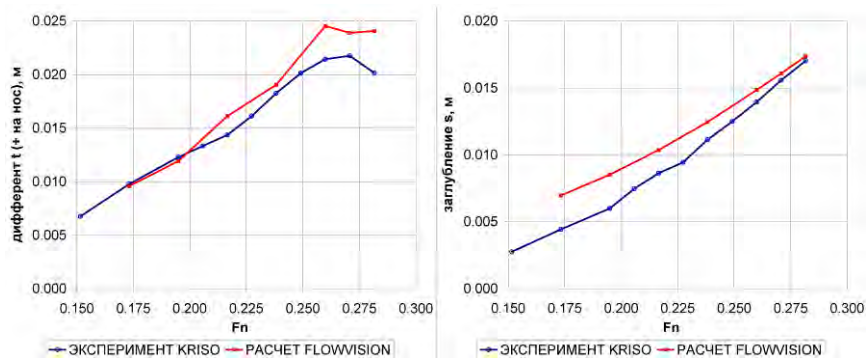


Рис. 4

Сравнение показало высокую точность по буксировочному сопротивлению при  $F_n > 0.26$  и заметное завышение расчетных данных при низких  $F_n$ . Одной из причин завышения представляется особенность расчетной сетки, которая была построена с учетом максимальных амплитуд корабельных волн, наблюдаемых при высоких  $F_n$ . 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  $F_n$ , что, однако, требует больших затрат времени.

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  $F_n$ ).

Относительные погрешности расчетов в различных ПК по итогам семинара «Гетеборг-2010» и полученные в настоящей работе сопоставлены на рис. 5. 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.

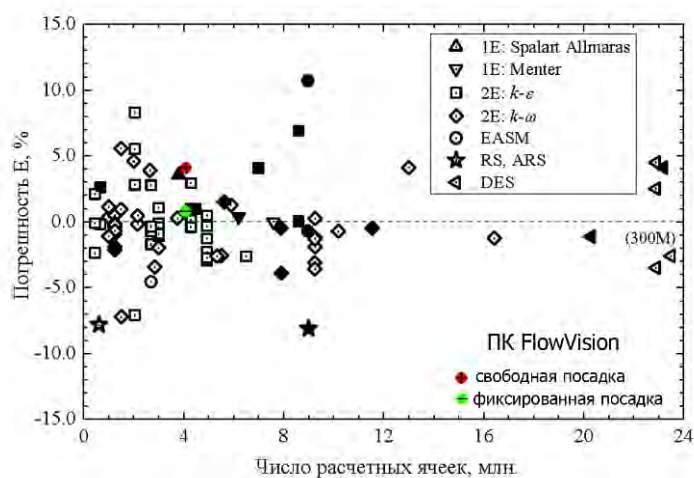


Рис. 5

## Список литературы

1. L. Larsson, F. Stern and V. Bertram. Benchmarking of computational fluid dynamics for ship flow: the Gothenburg 2000 Workshop // J. Ship Research, 2003, Vol. 47. – P. 63-81
2. L. Larsson, F. Stern and M. Visonneau. 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