DOI: 10.24937/2542-2324-2019-3-389-73-82
УДК 532.5.004.1+519.6

А.Е. Таранов
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНТЕЙНЕРОВОЗА В ЦИФРОВОМ БАССЕЙНЕ

Объект и цель научной работы. Целью работы является валидация комплекса технологий численного моделирования динамики вязкой жидкости (цифровой бассейн) на примере исследования характеристик модели контейнеровоза KCS.

Материалы и методы. Для определения локальных и интегральных гидродинамических характеристик контейнеровоза используются методы вычислительной гидродинамики. Характеристики течения вязкой жидкости находятся из решения методом контрольного объема нестационарных уравнений Рейнольдса, замкнутых двухпараметрической полуэмпирической моделью турбулентности. Для валидации технологий численного моделирования используется большой объем данных экспериментальных исследований различных опытовых бассейнов.

Основные результаты. Валидация комплекса технологий численного моделирования на примере решения задач, которые связаны с процессом обтекания контейнеровоза KCS и его гребного винта потоком вязкой жидкости (определение буксировочного сопротивления и посадки судна, кривых действия гребного винта, номинального поля скоростей в диске гребного винта, сопротивления судна и элементов его посадки на встречном волнении, а также численное моделирование самоходных испытаний), выполненная на основе сравнения с результатами экспериментальных исследований, демонстрирует высокую точность современных расчетных методов.

Заключение. Опыт использования численных методов в Крыловском государственном научном центре показывает постепенное увеличение круга задач, решаемых с помощью численного моделирования. Использование расчетных методов в корабельной гидродинамике позволяет расширить возможности экспериментальной базы при изучении особенностей протекания физических процессов. При этом на первый план выходит анализ локальных особенностей течения и развития их во времени, а также повышение точности прогнозирования характеристик проектируемого объекта применительно к натурным условиям.

Ключевые слова: численное моделирование, физическое моделирование, валидация, цифровой бассейн.
Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2019-3-389-73-82
UDC 532.5.004.1+519.6

A. Taranov
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

DETERMINATION OF LOCAL AND INTEGRAL PARAMETERS FOR CONTAINER CARGO CARRIER IN DIGITAL BASIN

Object and purpose of research. This paper is intended to validate the set of CFD technologies for viscous fluid (digital basin) by means of the case study (investigation of KCS container ship model parameters).

Materials and methods. Local and integral hydrodynamic parameters of the container ship are investigated by means of CFD tools. Viscous flow parameters are obtained through control-volume solution of unsteady Reynolds equations, closed by bi-parametric semi-empirical turbulence model. Numerical simulation technologies are validated by extensive test data obtained by various test tanks.

Для цитирования: Таранов А.Е. Определение локальных и интегральных гидродинамических характеристик контейнеровоза в цифровом бассейне. Труды Крыловского государственного научного центра. 2019; 3(389): 73–82.

For citations: Taranov A. Determination of local and integral parameters for container cargo carrier in digital basin. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2019; 3(389): 73–82 (in Russian).

Main results. Validation of the CFD tool set by means of the flow studies of KSC container ship and her propeller (calculation of towing resistance, trim & draft parameters, propeller performance curves, nominal wake field, hull resistance and trim & draft parameters in head waves, and also numerical simulation of self-propulsion tests) and by comparison of these data versus experimental results has confirmed high accuracy of modern calculation methods.
Conclusion. KSRC experience of numerical studies shows that the scope of tasks handled by numerical simulation is steadily becoming wider and wider. Applications of CFD methods in marine hydrodynamics enhances the potential of conventional test facilities in the studies on specifics of certain physical processes. Here, analysis of local flow peculiarities and their time history, as well as accuracy of full-scale predictions for ship under design, become very important.
Keywords: numerical simulation, physical modeling, validation, digital basin.
Author declares lack of the possible conflicts of interests.

Введение
Introduction

Перспективным путем развития российской судостроительной отрасли является внедрение технологий численного моделирования в процессы проектирования, создания и сопровождения эксплуатации актуальных и перспективных объектов морской техники. Точность современных численных методов, низкая стоимость высокопроизводительных ресурсов и их доступность, обеспечивающая скорость выполнения расчетов, постепенно изменяют отношение к численному моделированию. Это, в свою очередь, ведет к постоянному повышению доли численного моделирования при проведении НИОКР.

Примером успешной работы в этом направлении является интегрированная среда гидродинамического проектирования, разработанная в США в интересах ВМФ [1]. Интегрированная среда позволяет решать мультидисциплинарные задачи, реализует согласованный и квалифицированный инструментарий, объединяет доверенные источники исходных данных и библиотеки типовых решений. Другим современным решением является проект «Цифровой бассейн», разрабатываемый в КНР с 2017 г. консорциумом из шести НИИ и Китайского классификационного общества [2].

Настоящая статья освещает прогресс в разработке комплекса технологий численного моделирования динамики вязкой жидкости (цифровой бассейн), выполняемой ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Целью работы является валидация существующих технологий численного моделирования обтекания судна и его движителя. В качестве объекта исследования используется международная тестовая модель контейнеровоза KCS (KRISO container ship), разработанная Южно-Корейским научно-исследовательским институтом кораблестроения и океанической инженерии (Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, KRISO). Результаты численного моделирования, полученные с использованием коммерческого программного обеспечения Star-CCM+, сравниваются с экспериментальными данными, представленными в 2015 г. на симпозиуме Workshop on CFD in Ship Hydrodynamics в г. Токио, Япония [3–7].

Постановка задачи и используемые методы
Formulation of tasks and methods of study

На рис. 1 представлен внешний вид модели контейнеровоза KCS. Геометрические параметры модели указаны в табл. 1.

Рассматриваются следующие задачи, связанные с процессом обтекания контейнеровоза KCS и его гребного винта (пр. KP505) потоком вязкой жидкости:

- определение буксировочного сопротивления и посадки судна;
- определение кривых действия гребного винта в условиях «свободной воды»;
- определение номинального поля скоростей в диске гребного винта;

Рис. 1. Общий вид модели контейнеровоза KCS
Fig. 1. KCS container ship model: general view

- численное моделирование самоходных испытаний;
- определение сопротивления судна и элементов его посадки на встречном волнении.

Для решения всех задач использован пакет вычислительной гидродинамики Star-CCM+ фирмы Siemens. Построение гексаэдральных расчетных сеток выполнено с помощью встроенного в пакет Star-CCM+ генератора сеток. Безразмерная толщина первого слоя призматического подслоя на модели гребного винта y_1^+ составляет ~0,5, на корпусе модели судна – 80–100. Во всех расчетах используется модель турбулентности *k*-ω SST [8] в комбинированном (высоко- и низкорейнольдсовом) варианте. В задаче определения поля скоростей в диске гребного винта используется *k*-ω SST DES-метод [9] в IDDES-формулировке.

Определение буксировочного сопротивления и посадки судна

Determination of towing resistance and trim & draft parameters

Задача об определении буксировочного сопротивления контейнеровоза KCS решается в нестационарной постановке со схемами второго порядка для дискретизации по пространству и времени. Размерность расчетной сетки – 1,95 млн ячеек. Используются 2 степени свободы: всплытие и дифферент. Условия проведения численного моделирования соответствуют тестовому случаю 2.1 Токийского симпозиума. Масса судна выбрана из условия нулевого всплытия в отсутствие хода. На рис. 2–4 приведено сравнение коэффициента буксировочного сопротивления $C_T = R_T/(1/2\rho U^2 S)$, всплытия (σ) и дифферента (τ) модели контейнеровоза, полученных численным методом, с результатами экспериментальных исследований. Численные значения гидродинамических характеристик (ГДХ) и погрешность их определения представлены в табл. 2. Относительная погрешность определения всплытия и дифферента увеличивается при приближении их абсолютных значений к нулю. По этой причине в табл. 3 приведены значения погрешностей, нормированные по значениям ГДХ при ходовом числе

Таблица 1. Главные размерения модели контейнеровоза KCS [4]
Table 1. Main dimensions of KCS container ship model [4]

Параметр	Значение
Длина между перпендикулярами L_{PP}, м	7,2786
Ширина, м	1,019
Высота, м	0,6013
Число Фруда $\mathrm{Fn} = \dfrac{U}{\sqrt{L_{pp} \cdot g}}$	0,26
Число Рейнольдса $\mathrm{Rn} = \dfrac{U \cdot L_{pp}}{\nu}$	$1{,}4 \cdot 10^7$
Скорость U, м/с	2,1964
Осадка, м	0,3418
Водоизмещение, м^3	1,649
Площадь смоченной поверхности S, м^2	9,5121
Коэффициент полноты	0,650

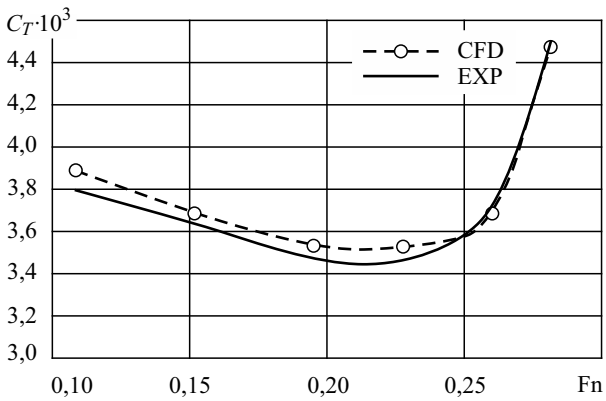

Рис. 2. Коэффициент сопротивления буксируемой модели контейнеровоза KCS для различных чисел Фруда

Fig. 2. Resistance coefficient of towed KCS container ship model for different Froude numbers

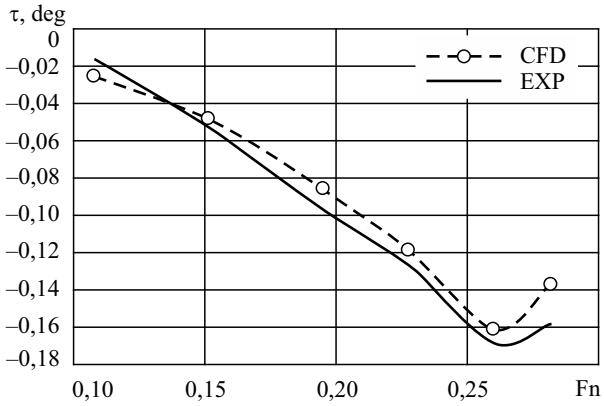

Рис. 3. Дифферент буксируемой модели контейнеровоза KCS для различных чисел Фруда

Fig. 3. Trim of towed KCS container ship model for different Froude numbers

Таблица 2. Результаты численного моделирования буксировочного сопротивления
Table 2. Numerical simulation results for towing resistance

CFD data				Experimental data			Errors, %		
Fn	$C_T \cdot 10^{-3}$	Trim, deg	Sinkage, m	$C_T \cdot 10^{-3}$	Trim, deg	Sinkage, m	C_T	Trim	Sinkage
0,108	3,891	–0,0260	–0,0024	3,796	–0,017	–0,00090	2,5	52,9	166,7
0,152	3,687	–0,0488	–0,0042	3,641	–0,053	–0,00275	1,3	–7,9	52,7
0,195	3,536	–0,0867	–0,0075	3,475	–0,097	–0,00599	1,8	–10,6	24,5
0,227	3,528	–0,1193	–0,0105	3,467	–0,127	–0,00944	1,8	–6,1	11,2
0,260	3,685	–0,1620	–0,0145	3,711	–0,169	–0,01394	–0,7	–4,1	4,0
0,282	4,467	–0,1380	–0,0175	4,501	–0,159	–0,01702	–0,8	–13,2	2,8

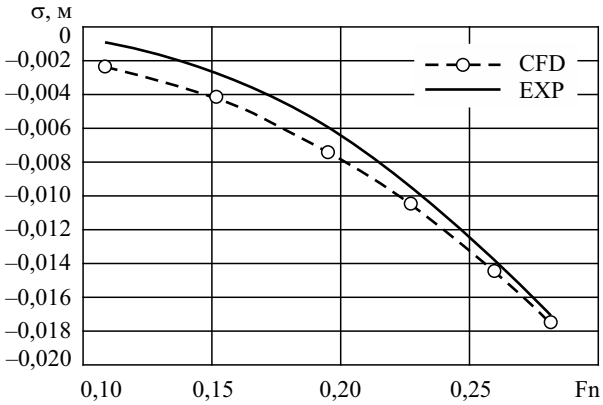

Рис. 4. Всплытие буксируемой модели контейнеровоза KCS для различных чисел Фруда
Fig. 4. Sinkage of towed KCS container ship model for different Froude numbers

Таблица 3. Погрешности результатов численного моделирования, нормированные по характеристикам ходового числа Фруда
Table 3. Errors of numerical simulation results as fractions of running Froude numbers

	Errors, %		
Fn	C_T, %	Trim, %	Sinkage, %
0,108	2,6	5,3	10,8
0,152	1,2	–2,5	10,4
0,195	1,6	–6,1	10,5
0,227	1,7	–4,6	7,6
0,260	–0,7	–4,1	4,0
0,282	–0,9	–12,4	3,4

Фруда (Fn = 0,26). Следует обратить внимание, что погрешности определения коэффициента сопротивления, не стремящегося к нулю в рассматриваемом диапазоне чисел Фруда, практически не изменяются в не зависимости от способа их нормирования.

На рис. 5 (см. вклейку) приведено сравнение волновой системы на границе раздела сред, полученной в результате численного моделирования (полупрозрачная цветная заливка) и в результате замеров в KRISO (черные линии). В соответствии с условиями эксперимента [4] численное моделирование выполнялось для числа Фруда Fn = 0,26 и при фиксированной посадке модели судна на ровный киль.

Определение кривых действия гребного винта в условиях «свободной воды»

Determination of open-water performance curves for propeller

Геометрическая модель гребного винта KP505, спроектированного в KRISO для контейнеровоза KCS, доступна на сайте Токийского симпозиума 2015 г. [10]. Основные характеристики модели гребного винта KP505 представлены в табл. 4.

Задача об определении кривых действия модели гребного винта KP505 решается в нестационарной постановке со схемами второго порядка для дискретизации по пространству и времени. В качестве модели турбулентности использована модель Ментера k-ω SST в низкорейнольдсовой постановке в сочетании с моделью ламинарно-турбулентного перехода Ментера – Лэнгтри [11]. В расчетах принята плотность воды $\rho = 1000$ кг/м^3, динамическая вязкость $\mu = 1{,}141 \cdot 10^{-3}$ Па/с.

Призматическая область расчетной сетки состоит из 25 слоев. Толщина первого слоя ($3{,}0\cdot10^{-6}$ м) выбрана, исходя из удовлетворения требований модели ламинарно-турбулентного перехода к значению безразмерной величины y^+. Размерность расчетной сетки составляет 12,7 млн ячеек.

Сравнение кривых действия (коэффициент упора $K_T = \dfrac{T}{\rho n^2 D^4}$, коэффициент момента $K_Q = \dfrac{Q}{\rho n^2 D^5}$ и коэффициент полезного действия $eta_0 = \dfrac{J}{2\pi}\dfrac{K_T}{K_Q}$) модели гребного винта KP505, полученных численным методом, с результатами экспериментальных исследований [12], приведено на рис. 6. Численные значения гидродинамических характеристик и погрешность их определения представлены в табл. 5.

Определение номинального поля скоростей в диске гребного винта

Determination of nominal wake field

На рис. 7 и 8 (см. вклейку) приведено сравнение продольной компоненты скорости, обезразмеренной на скорость буксировки $U = 2{,}196$ м/с, полученной в результате численного моделирования (цветная заливка) и замеров в KRISO (черные линии). В соответствии с условиями эксперимента [4] численное моделирование выполнялось для числа

Таблица 4. Основные характеристики модели гребного винта KP505

Table 4. Main parameters of KP505 propeller model

Параметр	Значение
D, m	0,25
$(P/D)_{mean}$	0,95
Ae/A0	0,8
Hub Ratio	0,18
Number of Blades	5
Section	NACA66
$(Rake/D)_{tip}$	0
Skew, deg	32

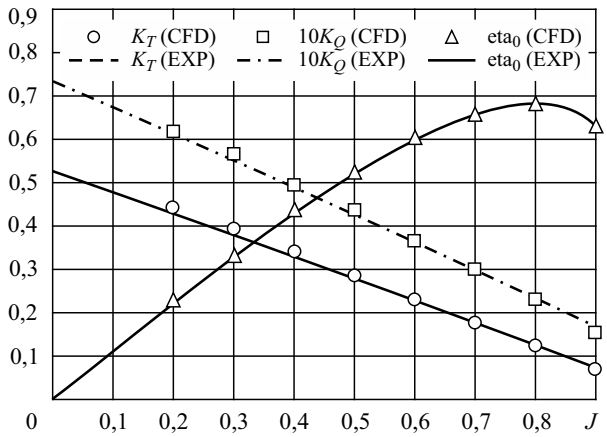

Рис. 6. Кривые действия модели гребного винта KP505 в условиях «свободной воды»

Fig. 6. Open-water performance curves of KP505 propeller model

Таблица 5. Результаты расчета кривых действия модели гребного винта

Table 5. Propeller performance curves: calculation results

	CFD data			Experimental data			Errors, %		
J	K_T	$10K_Q$	eta_0	K_T	$10K_Q$	eta_0	K_T	$10K_Q$	eta_0
0,2	0,442	0,618	0,228	0,428	0,613	0,222	3,32	0,70	0,58
0,3	0,392	0,565	0,331	0,378	0,552	0,327	3,46	2,29	0,37
0,4	0,339	0,494	0,438	0,329	0,490	0,427	3,25	0,71	1,08
0,5	0,284	0,436	0,518	0,279	0,428	0,518	1,82	1,92	–0,05
0,6	0,230	0,365	0,601	0,228	0,364	0,598	0,77	0,22	0,32
0,7	0,175	0,299	0,654	0,177	0,300	0,659	–1,08	–0,43	–0,43
0,8	0,122	0,229	0,679	0,126	0,235	0,684	–3,45	–2,74	–0,50
0,9	0,067	0,153	0,626	0,075	0,169	0,633	–10,38	–9,42	–0,67

Таблица 6. Результаты численного моделирования самоходных испытаний

Table 6. Self-propulsion tests: numerical simulation data

Характеристика	Exp. data	k-ω SST	Errors, %	k-ω SST + γ-Re_θ	Errors, %
R_{TSp}, Н		–90,69		–90,81	
T, Н		58,22		59,21	
Q, Н·м		2,626		2,583	
Z, Н	–30,25	–32,47	7,3	–31,60	4,5
C_{TSp}	$3{,}966\cdot10^{-3}$	$3{,}990\cdot10^{-3}$	0,6	$3{,}995\cdot10^{-3}$	0,7
K_T	0,170	0,1653	–2,8	0,1681	–1,1
K_Q	0,0288	0,0298	3,5	0,0293	1,9

Фруда Fn = 0,26 и при фиксированной посадке модели судна на ровный киль. Размерность расчетной сетки составляет 44 млн ячеек.

Численное моделирование самоходных испытаний

Numerical simulation of self-propulsion tests

В соответствии с условиями теста № 2.5 Токийского симпозиума 2015 г. численное моделирование самоходных испытаний модели KCS, оборудованной гребным винтом KP505, выполняется при фиксированной скорости буксировки $U = 2{,}196$ м/с и фиксированной частоте вращения вала $n = 9{,}5$ об/сек. Посадка модели судна зафиксирована в положении на ровный киль при отсутствии всплытия. Определяются коэффициент сопротивления судна в самоходных испытаниях $C_{TSp} = \dfrac{R_{TSp}}{\frac{1}{2}\rho U^2 S}$, коэффициенты упора ($K_T$) и момента ($K_Q$) гребного винта, а также сила реакции буксировочной тележки Z, представляющая собой разницу между сопротивлением судна в условиях самоходных испытаний (R_{TSp}) и упором гребного винта (T). Размерность расчетной сетки составляет 7,5 млн ячеек, из них 3,5 млн ячеек находятся во вращающемся регионе, 4 млн ячеек – в неподвижном регионе. Численные значения гидродинамических характеристик и погрешность их определения при использовании стандартной модели турбулентности k-ω SST и модели турбулентности, дополненной моделью ламинарно-турбулентного перехода, представлены в табл. 6.

На рис. 9 приведены зависимости сопротивления судна, упора гребного винта и реакции буксировочной тележки от времени. В момент времени $T = 16$ с произведено включение модели ламинарно-турбулентного перехода, что заметно на кривой упора гребного винта. Наличие отрывного течения в кормовой оконечности модели, буксируемой с постоянной скоростью, приводит к колебаниям сопротивления модели и, как следствие, к колебаниям реакции буксировочной тележки. Следует отметить, что указанные колебания являются затухающими. Представленный на рис. 9 временной интервал соответствует прохождению 10 длин судна. Такое поведение сопротивления моделей судов наблюдается и в опытовых бассейнах.

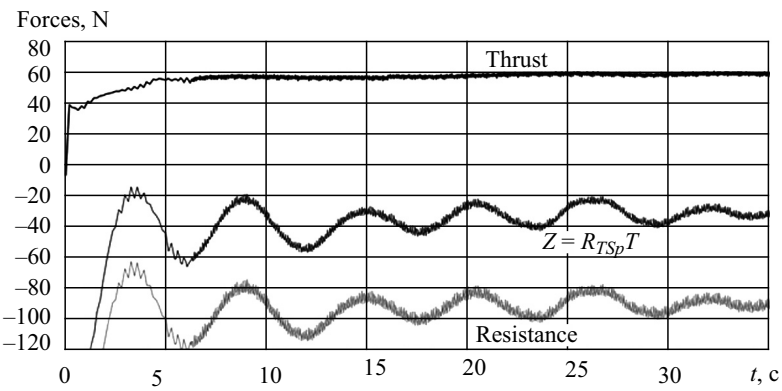

Рис. 9. Зависимость сопротивления судна, упора гребного винта и реакции буксировочной тележки от времени

Fig. 9. Time histories for ship resistance, propeller thrust and towing carriage response

Определение сопротивления на волнении

Determination of wave resistance

Численное моделирование динамики модели судна выполняется в соответствии с условиями теста № 2.10 Токийского симпозиума 2015 г. Модель судна масштаба 1:37.9 имеет две степени свободы: продольная качка и вертикальная качка. Исследуется 6 режимов движения модели судна с постоянной скоростью (Fn = 0,261). Характеристики волнения для шести расчетных вариантов представлены в табл. 7, где использованы следующие обозначения: λ – длина волны; h_W – высота волны.

Размеры расчетной области соответствуют размерам опытового бассейна FORCE [6], представившего данные экспериментальных исследований для Токийского симпозиума 2015 г. Для моделирования динамики судна используется технология перекрывающихся сеток. Общая размерность расчетной сетки составляет 11,8 млн ячеек. Фрагменты расчетной сетки в носовой и кормовой оконечностях судна представлены на рис. 10 (см. вклейку).

Зависимости коэффициента сопротивления модели судна KCS и элементов его посадки при нахождении в различных условиях встречного волнения, полученные численным методом и в ходе экспериментальных исследований [6], приведены на рис. 11–13. Численные значения гидродинамических характеристик (средние значения и амплитуды первых гармоник), а также погрешность их определения представлены в табл. 8–10. Всплытие модели судна z обезразмерено на амплитуду волны $\zeta = h_W/2$, угол дифферента обезразмерен на амплитуду волны и волновое число $k = 2\pi/\lambda$. В силу отсутствия волнения данные для расчетного случая $C0$ приведены в величинах, отличных от используемых в остальных частях таблиц.

Полученные результаты хорошо согласуются с данными экспериментальных исследований [6], за исключением угла дифферента на режимах С3–С5. Большие погрешности можно объяснить предельно малыми абсолютными значениями угла дифферента, полученными в эксперименте – 0,004–0,012°. Точность определения амплитуд колебания исследуемых величин зависит от точности задания матрицы моментов инерции. Эти величины должны аккуратно определяться при проведении экспериментальных исследований, используемых для валидации численных методов. В настоящей работе использована матрица моментов инерции, предоставленная

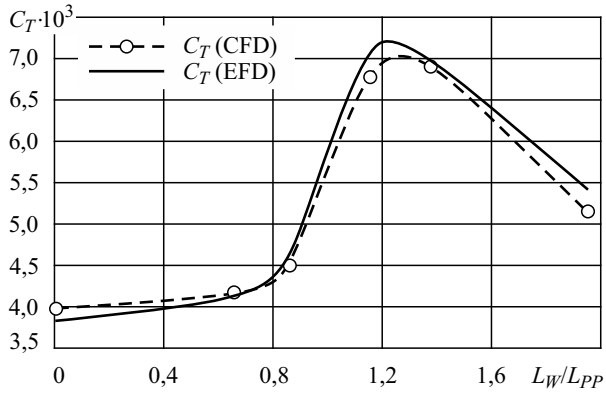

Рис. 11. Зависимость коэффициента сопротивления судна на волнении от относительной длины волны

Fig. 11. Wave resistance coefficient of ship versus relative wave length

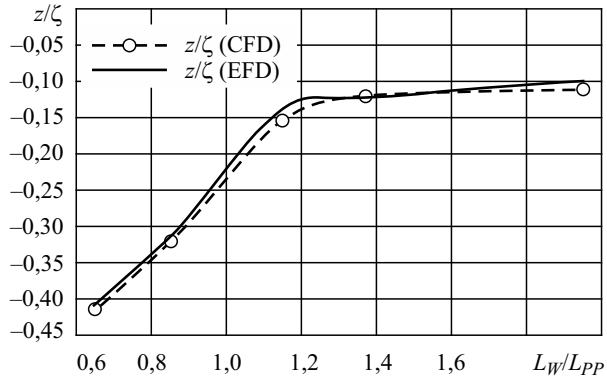

Рис. 12. Зависимость относительного всплытия на волнении от относительной длины волны

Fig. 12. Relative sinkage in waves versus relative wave length

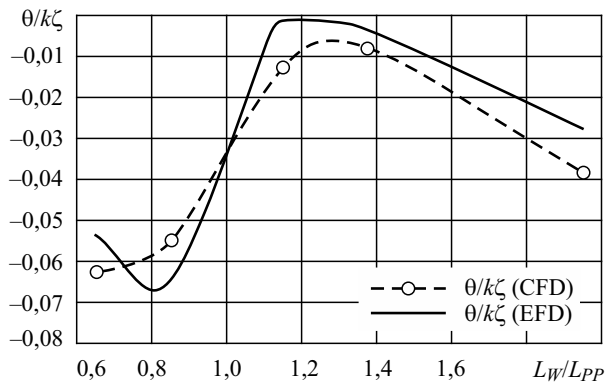

Рис. 13. Зависимость относительного угла дифферента на волнении от относительной длины волны

Fig. 13. Relative trim angle in waves versus relative wave length

Таблица 7. Исходные данные расчетных вариантов теста № 2.10
Table 7. Input data of calculation variants in Test 2.10

	C0	C1	C2	C3	C4	C5
Скорость, м/с			2,017			
Число Фруда			0,261			
Число Рейнольдса			$1{,}076 \cdot 10^7$			
λ/L_{PP}	0	0,651	0,851	1,15	1,371	1,951
h_W, м	0	0,062	0,078	0,123	0,149	0,196

Таблица 8. Результаты расчета коэффициента сопротивления модели KCS на встречном волнении
Table 8. Calculation results for KCS model resistance coefficient in head waves

	$C_T \cdot 10^3$, CFD	$C_T \cdot 10^3$, EFD	Errors, %	$C_T \cdot 10^3$, CFD	$C_T \cdot 10^3$, EFD	Errors, %
	Среднее значение			Амплитуда первой гармоники		
*C*0	3,98	3,835	3,8	–	–	–
*C*1	4,1712	4,127	1,07	2,3	3,324	–30,8
*C*2	4,500	4,622	–2,63	3,585	5,844	–38,6
*C*3	6,7886	7,079	–4,10	4,45	–	–
*C*4	6,9152	6,978	–0,90	10,45	12,773	–18,2
*C*5	5,1529	5,421	–4,94	20,4	25,101	–18,7

Таблица 9. Результаты расчета относительного всплытия модели KCS на встречном волнении
Table 9. Calculation results for KCS model sinkage in head waves

	z/ζ, CFD	z/ζ, EFD	Errors, %	z/ζ, CFD	z/ζ, EFD	Errors, %
	Среднее значение			Амплитуда первой гармоники		
*C*0 (z/L_{PP})	$-2{,}11 \cdot 10^{-3}$	$-2{,}07 \cdot 10^{-3}$	1,67	–	–	–
*C*1	–0,4161	–0,4045	2,87	0,093	0,1286	–27,7
*C*2	–0,3179	–0,314	1,26	0,189	0,2413	–21,67
*C*3	–0,1544	–0,139	11,1	0,825	0,899	–8,23
*C*4	–0,1208	–0,1245	–2,97	0,84	0,8743	–3,92
*C*5	–0,1122	–0,1005	11,7	0,809	0,9312	–13,1

Таблица 10. Результаты расчета относительного угла дифферента модели KCS на встречном волнении
Table 10. Calculation results for relative trim angle of KCS model in head waves

	$\theta/k\zeta$, CFD	$\theta/k\zeta$, EFD	Errors, %	$\theta/k\zeta$, CFD	$\theta/k\zeta$, EFD	Errors, %
	Среднее значение			Амплитуда первой гармоники		
*C*0 (deg)	–0,18	–0,1646	9,36	–	–	–
*C*1	–0,0612	–0,0539	13,57	0,0149	0,0163	-8,59
*C*2	–0,5627	–0,06515	–13,62	0,18	0,1456	23,6
*C*3	–0,01261	–0,0013	869	0,6545	0,748	–12,5
*C*4	–0,00797	–0,00345	131	0,884	0,9646	–8,36
*C*5	–0,03859	–0,0281	37,4	0,975	1,1185	–12,83

организаторами Токийского симпозиума 2015 г. Высокая погрешность амплитуды первой гармоники коэффициента сопротивления может быть объяснена абсолютно жестким закреплением модели судна в продольном направлении в численном моделировании, что отличается от реального крепления модели в физическом эксперименте. Учесть реальные условия закрепления не представляется возможным в силу отсутствия точной информации об элементах экспериментальной установки.

На рис. 14 (см. вклейку) приведены мгновенные деформации волновой поверхности около корпуса судна при его движении на встречном волнении различной интенсивности, иллюстрирующие выполненное численное моделирование.

Используемая технология численного моделирования не ограничивается только встречным волнением. Как показано в работе [13], также возможно определение параметров качки в условиях косого волнения.

Заключение

Conclusion

Обострение конкурентной борьбы в современной мировой экономике заставляет производителей и разработчиков вести активный поиск путей повышения эффективности всех бизнес-процессов. Цифровая трансформация бизнес-процессов является одним из ключевых компонентов формирующейся цифровой экономики применительно ко всем отраслям промышленности.

Мировой опыт [1, 2] показывает, что в процессе создания инновационных технологий и продукции в судостроении активно используется математическое моделирование, роль которого с развитием возможностей вычислительной техники стремительно растет.

Приведенные в настоящей работе результаты комплексного исследования модели контейнеровоза расчетными методами и их сравнения с экспериментальными данными показывают, что численное моделирование обеспечивает хорошую точность прогнозирования локальных и интегральных гидродинамических характеристик в рассмотренных задачах. При этом в части работ численные методы пока еще требуют больших временных затрат, чем аналогичное физическое моделирование. Это касается, например, самоходных испытаний. В то же время по другим позициям численное моделирование сравнялось с экспериментом по срокам и стоимости проведения исследований. Часто специализация опытовых бассейнов требует изготовления различных физических моделей для проведения различных типов испытаний (буксировочные, мореходные, маневренные и т.д.). Численное моделирование лишено этого недостатка, а если принять во внимание возможность получения в рамках одного расчета комплексных данных по локальным и интегральным характеристикам без необходимости менять измерительное оборудование, становится ясно, что численное моделирование физических процессов постепенно укрепляет свои позиции в судостроении.

Опыт использования численных методов в Крыловском научном центре показывает, что применение численного моделирования в корабельной гидродинамике позволяет расширить возможности экспериментальной базы при изучении особенностей протекания физических процессов (при этом на первый план выходит анализ локальных особенностей течения и развитие их во времени), а также выявить основные факторы, определяющие свойства изучаемого объекта за счет логичности и формализованности компьютерных моделей.

Библиографический список

1. *Wilson W.*, *Quezon T.*, *Trinh V.*, *Sarles C.*, *Li J.*, *Gorski J.* HPCMP CREATE-SH Integrated Hydrodynamic Design Environment // Computing in Science & Engineering. 2016. Vol. 18. No. 6. P. 47–56.
2. Numerical tank [электрон. ресурс] / Chinese numerical tank virtual test system. URL: http://en.numerical-tank.com/ (дата обращения: 24.09.2018).
3. *Van S.H.*, *Kim W.J.*, *Yim G.T.*, *Kim D.H.*, *Lee C.J.* Experimental investigation of the flow characteristics around practical hull forms // Proceedings of 3rd Osaka Colloquium on Advanced CFD Applications to Ship Flow and Hull Form Design. Osaka, Japan, 1998.
4. *Kim W.J.*, *Van D.H.*, *Kim D.H.* Measurement of flows around modern commercial ship models // Exp. in Fluids. 2001. № 31. P. 567–578.
5. *Hino T.* Proceedings of CFD Workshop Tokyo 2005. NMRI report, 2005.
6. *Simonsen C.*, *Otzen J.*, *Stern F.* EFD and CFD for KCS heaving and pitching in regular head waves // Proceedings of 27th Symp. Naval Hydrodynamics. Seoul, Korea, 2008.
7. *Zou L.*, *Larsson L.* Additional data for resistance, sinkage and trim // Numerical Ship Hydrodynamics – An Assessment of the Gothenburg 2010 Workshop. Springer Business Media, Doordrecht.

8. *Menter F.R.* Two equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA Journal. 1994. Vol. 32. P. 1598–1605.
9. *Shur M.L.*, *Spalart P.R.*, *Strelets M.Kh.*, *Travin A.K.* A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modelled LES capabilities // International J. Heat and Fluid Flow. 2008. № 29(6). P. 1638–1649.
10. Fluid_performance_evaluation [электрон. ресурс] / National Maritime Research Institute. URL:http://www.nmri.go.jp/institutes/fluid_performance_evaluation/cfd_rd/cfdws15/file/Geometry_IGES_files/kcs/KP505.zip (дата обращения: 24.09.2018).
11. *Menter F.R.*, *Langtry R.B.*, *Likki S.R.*, *Suzen Y.B.*, *Huang P.G.*, *Völker S.A.* Correlation-based transition model using local variables. Part 1: Model Formulation // ASME J. Turbomachinery. 2006. № 128(3). P. 413–422.
12. *Paik K.-J.* Numerical study on the hydrodynamic characteristics of a propeller operating beneath a free surface // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2017. № 9(6). P. 655–667.
13. *Blishchik A.E.*, *Taranov A.E.* Numerical simulation of vessel dynamics in maneuverability and seakeeping problems // AIP Conference Proceedings 1959, 050004, 2018. DOI: 10.1063/1.5034632.

References

1. *W. Wilson*, *T. Quezon*, *V. Trinh*, *C. Sarles*, *J. Li*, *J. Gorski.* HPCMP CREATE-SH Integrated Hydrodynamic Design Environment // Computing in Science & Engineering. 2016. Vol. 18. No. 6. P. 47–56.
2. Numerical tank / Chinese numerical tank virtual test system. URL: http://en.numericaltank.com/ (accessed on 24.09.2018).
3. *S.H. Van*, *W.J. Kim*, *G.T. Yim*, *D.H. Kim*, *C.J. Lee.* Experimental investigation of the flow characteristics around practical hull forms // Proceedings of 3rd Osaka Colloquium on Advanced CFD Applications to Ship Flow and Hull Form Design. Osaka, Japan, 1998.
4. *W.J. Kim*, *D.H. Van*, *D.H. Kim.* Measurement of flows around modern commercial ship models // Exp. in Fluids. 2001. № 31. P. 567–578.
5. *T. Hino* Proceedings of CFD Workshop Tokyo 2005. NMRI report, 2005.
6. *C. Simonsen*, *J. Otzen*, *F. Stern.* EFD and CFD for KCS heaving and pitching in regular head waves // Proceedings of 27th Symp. Naval Hydrodynamics. Seoul, Korea, 2008.
7. *L. Zou*, *L. Larsson.* Additional data for resistance, sinkage and trim // Numerical Ship Hydrodynamics – An Assessment of the Gothenburg 2010 Workshop. Springer Business Media, Doordrecht.
8. *F.R. Menter.* Two equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA Journal. 1994. Vol. 32. P. 1598–1605.
9. *M.L. Shur*, *P.R. Spalart*, *M.Kh. Strelets*, *A.K. Travin*. A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modelled LES capabilities // International J. Heat and Fluid Flow. 2008. № 29(6). P. 1638–1649.
10. Fluid_performance_evaluation / National Maritime Research Institute. URL:http://www.nmri.go.jp/institutes/fluid_performance_evaluation/cfd_rd/cfdws15/file/Geometry_IGES_files/kcs/KP505.zip (accessed on 24.09.2018).
11. *F.R. Menter*, *R.B. Langtry*, *S.R. Likki*, *Y.B. Suzen*, *P.G. Huang*, *S.A. Völker.* Correlation-based transition model using local variables. Part 1: Model Formulation // ASME J. Turbomachinery. 2006. № 128(3). P. 413–422.
12. *Paik K.-J.* Numerical study on the hydrodynamic characteristics of a propeller operating beneath a free surface // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2017. № 9(6). P. 655–667.
13. *A.E. Blishchik*, *A.E. Taranov.* Numerical simulation of vessel dynamics in maneuverability and seakeeping problems // AIP Conference Proceedings 1959, 050004, 2018. DOI: 10.1063/1.5034632.

Сведения об авторе

Таранов Андрей Евгеньевич, к.т.н., начальник Суперкомпьютерного центра математического моделирования ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: 8 (812) 748-63-19. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

About the author

Andrey Ye. Taranov, Can. Sci (Eng.), Head of High-Performance Computer Centre, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: 8 (812) 748-63-19. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Поступила / Received: 25.05.19
Принята в печать / Accepted: 17.07.19
© Таранов А.Е., 2019