

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-3-401-28-38  
УДК 629.5.03+532.5:519.6

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

## ВАЛИДАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СУДОВЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ В ПАКЕТЕ ПРОГРАММ «ЛОГОС»

**Объект и цель научной работы.** Объектами исследования являются модели гребных винтов и рабочего колеса водомета. Цель работы – валидация нового расчетного модуля отечественного программного комплекса инженерного анализа «ЛОГОС» и технологии его использования для прогнозирования гидродинамических характеристик (ГДХ) судовых движителей на основе сравнения с данными экспериментальных исследований и эталонных расчетов в зарубежном коммерческом программном обеспечении.

**Материалы и методы.** Для определения ГДХ судовых движителей используются методы вычислительной гидродинамики. Характеристики течения вязкой жидкости находятся из решения методом контрольного объема нестационарных уравнений Рейнольдса (RANS), замкнутых двухпараметрической полуэмпирической моделью турбулентности. Для валидации результатов численного моделирования в программном комплексе «ЛОГОС» применяются данные экспериментальных исследований и эталонных расчетов, выполненных в Крыловском центре.

**Основные результаты.** Валидация нового расчетного модуля программного комплекса «ЛОГОС», выполненная на основе сравнения с результатами экспериментальных исследований и эталонных расчетов, демонстрирует высокую точность современного отечественного программного обеспечения в области вычислительной гидродинамики при решении задач определения гидродинамических характеристик гребных винтов.

**Заключение.** В работе показано, что определение ГДХ моделей судовых движителей в однородном потоке вязкой жидкости может быть выполнено с использованием отечественного программного комплекса «ЛОГОС». Точность прогнозирования ГДХ гребных винтов при этом не уступает ведущим зарубежным программным продуктам и подтверждается результатами экспериментальных исследований, выполненных в глубоководном опытовом бассейне Крыловского центра. Вместе с тем требуется дальнейшее развитие пакета программ «ЛОГОС» для корректного решения более сложных задач, связанных с судовыми движителями.

**Ключевые слова:** численное моделирование, расчетная сетка, ЛОГОС, валидация, гребной винт.

*Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.*

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-3-401-28-38  
UDC 629.5.03+532.5:519.6

A.V. Kuznetsova , A.E. Taranov   
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

## VALIDATION OF PREDICTION TECHNOLOGY OF SHIP PROPULSION HYDRODYNAMIC PERFORMANCE IN LOGOS SOFTWARE PACKAGE

**Object and purpose of research.** The objects of research are models of propeller and impeller of a water jet. The purpose of the work is to validate the new calculation module LOGOS of domestic software complex for engineering analysis

*Для цитирования:* Кузнецова А.В., Таранов А.Е. Валидация технологии прогнозирования гидродинамических характеристик судовых движителей в пакете программ «ЛОГОС». Труды Крыловского государственного научного центра. 2022; 3(401): 28–38.

*For citations:* Kuznetsova A.V., Taranov A.E. Validation of prediction technology of ship propulsion hydrodynamic performance in LOGOS software package. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2022; 3(401): 28–38 (in Russian).

and the technology for its use in predicting the hydrodynamic performance of ship propulsion based on comparison with experimental research data and reference calculations in foreign commercial software.

**Materials and methods.** Methods of computational fluid dynamics are used to determine the hydrodynamic performance of ship propulsion systems. The characteristics of the viscous fluid flow are obtained from the solution of non-stationary Reynolds equations (RANS (Reynolds averaged Navier-Stokes equations)) by control volume method. The Reynolds equations are closed by a two-parameter semi-empirical turbulence model. To validate the results of numerical modeling in the LOGOS software package, data from experimental studies and reference calculations performed at the Krylov Center are used.

**Main results.** Validation of the new calculation module of LOGOS software complex, performed on the basis of comparison with the results of experimental studies and reference calculations, demonstrates the high accuracy of modern domestic software in the field of computational fluid dynamics in solving problems of determining the hydrodynamic performance of propellers.

**Conclusion.** The paper shows that the determination of hydrodynamic performance of ship propulsion models in a uniform viscous fluid flow can be performed using the domestic software package LOGOS. The accuracy of predicting the hydrodynamic performance of propellers in the meantime compares favourably to leading foreign software products and is confirmed by the results of experimental studies carried out in the deepwater towing tank of Krylov Center. At the same time, further development of the LOGOS software package is required for the correct solution of more complex tasks related to ship propulsion.

**Keywords:** numerical modeling, computational grid, LOGOS, validation, propeller.

*The authors declare no conflicts of interest.*

## Введение

### Introduction

Постоянный прогресс в развитии программного обеспечения, реализующего методы вычислительной гидродинамики, способствует все более широкому и глубокому проникновению численного моделирования в практику научно-исследовательских и проектных работ.

Решение типичных для судостроения задач (обтекание тел потоком жидкости, моделирование вращения движителей, динамика тел на водной поверхности с учетом ветро-волновых нагрузок, моделирование процессов тепломассопереноса, кавитации и т.д.) требует применения точных физико-математических моделей и численных алгоритмов, специализированных сеточных генераторов, а также современных средств распараллеливания и постобработки.

Одним из пакетов программ, который удовлетворяет данным требованиям, является «ЛОГОС» [1] – российский программный комплекс, предназначенный для моделирования сопряженных трехмерных задач конвективного тепломассопереноса, аэродинамики, гидродинамики и прочности на высокопараллельных ЭВМ. «ЛОГОС» успешно прошел валидацию и показал хорошие результаты на серии различных промышленных задач [2], включая задачи со свободной поверхностью [3]. В состав пакета входит пре-постпроцессор, предназначенный для импорта и обработки трехмерных компьютерных моделей, генерации поверхностных и объемных сеток, имеющий визуальную среду для под-

готовки расчетной модели и интерактивную систему инженерной визуализации.

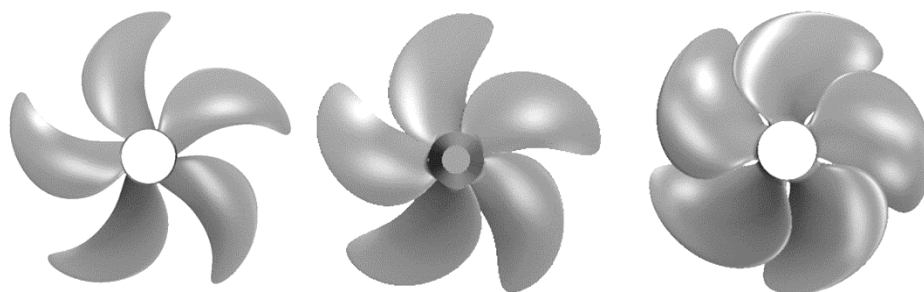
В настоящей статье рассматривается валидация пакета программ «ЛОГОС», включая недавно разработанный специалистами Федерального ядерного центра (РФЯЦ-ВНИИЭФ) и Крыловского центра программный модуль «ЛОГОС-Судостроение» [4], при прогнозировании гидродинамических характеристик (ГДХ) судовых движителей. Численное моделирование работы судовых движителей выполняется в соответствии с технологией, разработанной в Крыловском центре.

## Объекты исследования

### Objects of research

В качестве объектов исследования в работе рассматриваются три модели гребных винтов (ГВ) различной формы (*A*, *B* и *C*), характерные для быстроходных надводных судов и отличающиеся дисковым отношением (от 0,6 до 1,16).

Экспериментальные данные для винтов *A* и *C* получены в Крыловском центре. В качестве модели *B* взят международный тестовый винт КР505, разработанный Южно-Корейским научно-исследовательским институтом кораблестроения и океанической инженерии (Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, KRISO) [5]. Данные для гребного винта *B* представлены в 2015 г. на симпозиуме Workshop on CFD in Ship Hydrodynamics в Токио, Япония [6]. Форма рассмотренных моделей гребных винтов показана на рис. 1, а их геометрические характеристики приведены в табл. 1.



**Рис. 1.** Вид в плане исследованных моделей гребных винтов *A*, *B* и *C* (слева направо)

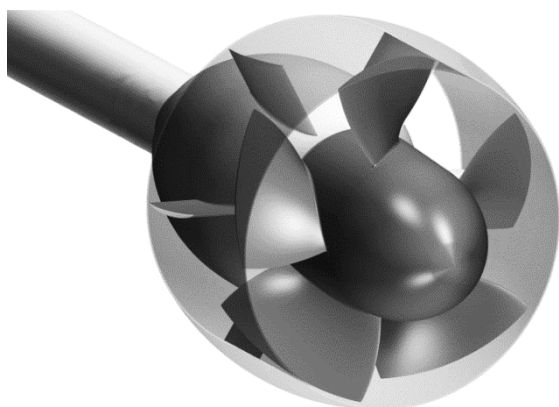
**Fig. 1.** Plan view of the studied propeller models *A*, *B* and *C* (from left to right)

**Таблица 1.** Геометрические характеристики моделей гребных винтов

**Table 1.** Geometric performance of propeller models

	Модель <i>A</i>	Модель <i>B</i>	Модель <i>C</i>
Диаметр модели <i>D</i> , мм	228	250	200
Число лопастей <i>Z</i>	5	5	5
Шаговое отношение <i>P/D</i>	0,9	0,95	1,25
Дисковое отношение <i>AE/A0</i>	0,6	0,8	1,16
Угол саблевидности, град.	33	32	30

Кроме моделей гребных винтов, в настоящей работе рассматривается модель водометного движителя насосного типа (ВДНТ) с коротким водоводом [7], представленная на рис. 2.



**Рис. 2.** Общий вид водометного движителя насосного типа с коротким водоводом

**Fig. 2.** General view of a pump jet with a short water duct

## Постановка задачи определения гидродинамических характеристик судового движителя

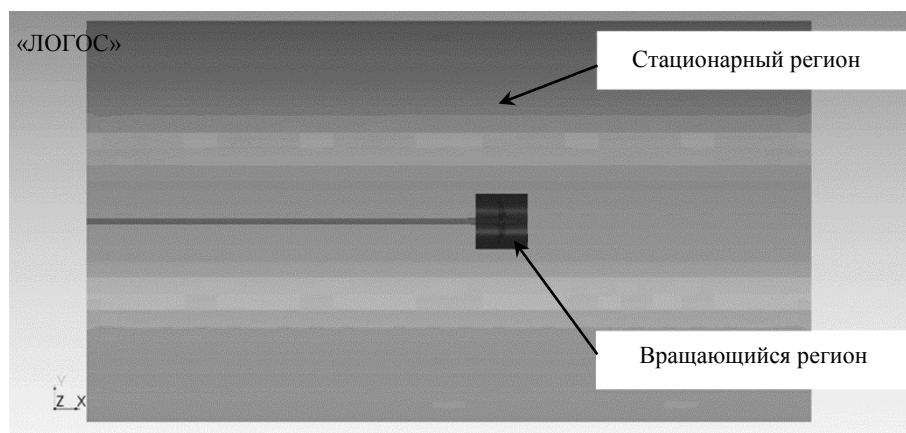
Statement of the problem for determining the hydrodynamic performance of the ship's propulsion

Для определения гидродинамических характеристик судовых движителей используется коммерческий пакет вычислительной гидродинамики «ЛОГОС» версии 5.3.20, включающий модуль «ЛОГОС-Судостроение». В соответствии с разработанной специалистами Крыловского центра технологией прогнозирования ГДХ судовых движителей в пакете программ «ЛОГОС» задача обтекания движителя потоком вязкой жидкости решается в нестационарной постановке со схемами второго порядка для дискретизации по пространству и времени.

В качестве модели турбулентности использована *k- $\omega$*  SST модель Ментера [8] в сочетании с моделью ламинарно-турбулентного перехода Ментера – Лэнгтри [9]. В расчетах принята плотность воды  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ , динамическая вязкость  $\mu = 1,141 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$ . В качестве схемы дискретизации для конвективных потоков выбрана противопоточная схема второго порядка LUD, для остальных слагаемых использована противопоточная схема первого порядка UD.

Построение гексаэдральных расчетных сеток выполнено с помощью встроенного в пакет «ЛОГОС» генератора сеток – также в соответствии с разработанной технологией прогнозирования ГДХ судовых движителей. Для этого расчетная область делится на два региона: внешний и внутренний (рис. 3). Вращающийся внутренний регион представляет собой цилиндрическую область вокруг движителя, стационарный внешний регион – цилиндрическую область с валом. Для модели ВДНТ вращающийся внутренний регион представляет

**Рис. 3.** Расчетная область  
**Fig. 3.** Design area



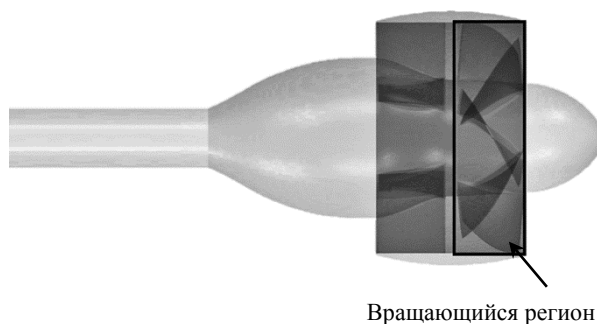
собой цилиндрическую область вокруг рабочего колеса, радиусом равным цилиндрической вставке в насадке водометного движителя (рис. 4), включая внутреннюю поверхность насадки ВД. Построение расчетных сеток выполняется отдельно для каждого

региона. Размеры полученных расчетных сеток представлены в табл. 2. Сгущение расчетной сетки строилось на кромках лопастей (рис. 5–6), вблизи поверхности движителя и в области концевых вихрей за движителем, как показано на рис. 7.

**Таблица 2.** Размерность расчетной сетки

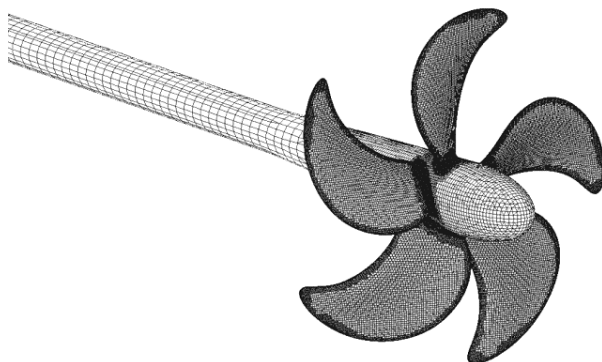
**Table 2.** Dimension of the design grid

	Модели гребного винта			Модель водометного движителя насосного типа
	A	B	C	
Размерность сетки, млн ячеек	3,9	10,3	14,2	25,3

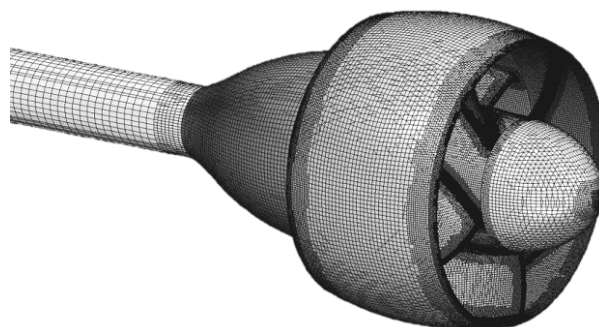


**Рис. 4.** Внутренний вращающийся регион расчетной области для модели водометного движителя насосного типа

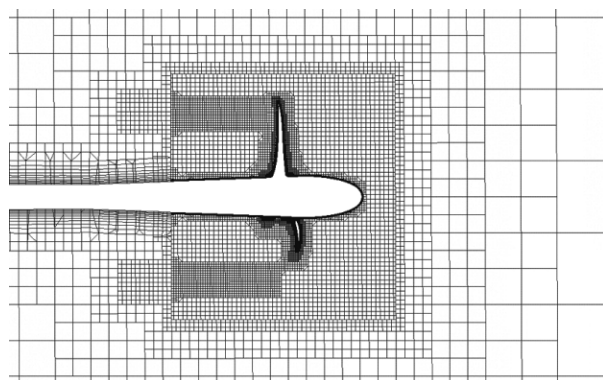
**Fig. 4.** Internal rotating area of the design area for the pump jet model



**Рис. 5.** Расчетная сетка на гребном винте  
**Fig. 5.** Calculation grid on the propeller



**Рис. 6.** Расчетная сетка на водометном движителе  
**Fig. 6.** Calculation grid on the water-jet



**Рис. 7.** Сгущение расчетной сетки вблизи гребного винта

**Fig. 7.** Thickening of the calculation grid near the propeller

## Результаты валидации для моделей гребных винтов

Validation results for propeller models

Для трех исследованных моделей гребных винтов проведено сравнение полученных ГДХ с резуль-

татами эксперимента и результатами эталонного расчета, выполненного с использованием программного обеспечения Star-CCM+ [10, 11]. Полученные результаты приведены в табл. 3–5 и на рис. 8–10.

Как видно из анализа результатов, пакет программ «ЛОГОС» обеспечивает высокую точность определения гидродинамических характеристик моделей гребных винтов (~3–5 %) на большей части кривых действия, незначительно (на 0,5–1 %) уступая ПО Star-CCM+. По мере приближения к поступу нулевого упора погрешности определения ГДХ гребных винтов возрастают в обоих программных комплексах, что связано со стремлением измеряемых и рассчитываемых величин ГДХ к нулю.

В табл. 3–5 использованы следующие обозначения:  $n$  – частота вращения модели;  $J$  – поступ гребного винта,  $J = V/(nD)$ , где  $V$  – скорость набегающего потока;  $K_T$  – коэффициент упора винта,  $K_T = T/(\rho n^2 D^4)$ ;  $K_Q$  – коэффициент момента винта,  $K_Q = Q/(\rho n^2 D^5)$ ; КПД – коэффициент полезного действия винта,  $\eta = J/(2\pi) \cdot K_T/K_Q$ .

**Таблица 3.** Результаты численного моделирования и экспериментальных исследований модели гребного винта А

**Table 3.** Results of numerical modeling and experimental studies of propeller model A

		Экспериментальные данные									
$n$ , об/с	20										
$J$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,671	0,7	0,8	0,9	
$K_T$	0,4384	0,3970	0,3531	0,3078	0,2616	0,2143	0,1792	0,1647	0,1113	0,0515	
$10K_Q$	0,5450	0,5061	0,4656	0,4232	0,3780	0,3290	0,2906	0,2741	0,2118	0,1390	
КПД	0,1280	0,2497	0,3621	0,4631	0,5508	0,6221	0,6591	0,6694	0,6695	0,5312	
		Данные эталонного расчета в ПО Star-CCM+									
$K_T$	0,4501	0,4037	0,3561	0,3078	0,2600	0,2126	0,1767	0,1611	0,1065	0,0434	
$10K_Q$	0,5557	0,5130	0,4684	0,4224	0,3754	0,3259	0,2865	0,2687	0,2038	0,1268	
КПД	0,1289	0,2505	0,3631	0,4641	0,5514	0,6232	0,6592	0,6683	0,6655	0,4903	
$\Delta K_T$	2,7 %	1,7 %	0,8 %	0,0 %	-0,6 %	-0,8 %	-1,4 %	-2,2 %	-4,3 %	-15,7 %	
$\Delta 10K_Q$	2,0 %	1,4 %	0,6 %	-0,2 %	-0,7 %	-0,9 %	-1,4 %	-2,0 %	-3,8 %	-8,8 %	
$\Delta \text{КПД}$	0,1 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %	0,0 %	-0,1 %	-0,4 %	-4,1 %	
		Данные расчета в ПО «ЛОГОС»									
$K_T$	0,4381	0,3977	0,3537	0,3075	0,2599	0,2123	0,1759	0,1609	0,1061	0,0454	
$10K_Q$	0,5489	0,5107	0,4690	0,4242	0,3753	0,3244	0,2829	0,2656	0,2013	0,1284	
КПД	0,1271	0,2480	0,3603	0,4618	0,5515	0,6255	0,6644	0,6754	0,6716	0,5062	
$\Delta K_T$	-0,1 %	0,2 %	0,2 %	-0,1 %	-0,6 %	-0,9 %	-1,8 %	-2,3 %	-4,7 %	-11,8 %	
$\Delta 10K_Q$	0,7 %	0,9 %	0,7 %	0,2 %	-0,7 %	-1,4 %	-2,6 %	-3,1 %	-5,0 %	-7,6 %	
$\Delta \text{КПД}$	-0,1 %	-0,2 %	-0,2 %	-0,1 %	0,1 %	0,3 %	0,5 %	0,6 %	0,2 %	-2,5 %	

**Таблица 4.** Результаты численного моделирования и экспериментальных исследований модели гребного винта В  
**Table 4.** Results of numerical modeling and experimental studies of propeller model В

Экспериментальные данные									
$n$ , об/с	20								
$J$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	
$K_T$	0,4279	0,3785	0,3287	0,2786	0,2282	0,1774	0,1263	0,0748	
$10K_Q$	0,6134	0,5522	0,4904	0,4277	0,3642	0,3000	0,2350	0,1693	
КПД	0,2220	0,3272	0,4268	0,5184	0,5982	0,6587	0,6841	0,6331	
Данные эталонного расчета в ПО Star-CCM+									
$K_T$	0,4421	0,3916	0,3394	0,2837	0,2299	0,1755	0,1219	0,0671	
$10K_Q$	0,6177	0,5649	0,4938	0,4359	0,3651	0,2988	0,2286	0,1533	
КПД	0,2278	0,3310	0,4375	0,5179	0,6015	0,6544	0,6790	0,6263	
$\Delta K_T$	3,3 %	3,5 %	3,3 %	1,8 %	0,7 %	-1,1 %	-3,5 %	-10,3 %	
$\Delta 10K_Q$	0,7 %	2,3 %	0,7 %	1,9 %	0,2 %	-0,4 %	-2,7 %	-9,5 %	
$\Delta КПД$	0,6 %	0,4 %	1,1 %	0,0 %	0,3 %	-0,4 %	-0,5 %	-0,7 %	
Данные расчета в ПО «ЛОГОС»									
$K_T$	0,4061	0,3669	0,3222	0,2732	0,2228	0,1710	0,1203	0,0663	
$10K_Q$	0,5781	0,5308	0,4763	0,4168	0,3550	0,2896	0,2211	0,1443	
КПД	0,2237	0,3302	0,4308	0,5219	0,5998	0,6583	0,6959	0,6583	
$\Delta K_T$	-5,1 %	-3,1 %	-2,0 %	-1,9 %	-2,4 %	-3,6 %	-4,75 %	-11,4 %	
$\Delta 10K_Q$	-5,8 %	-3,9 %	-2,9 %	-2,5 %	-2,5 %	-3,5 %	-5,93 %	-14,8 %	
$\Delta КПД$	0,2 %	0,3 %	0,4 %	0,4 %	0,2 %	0,0 %	1,73 %	2,5 %	

**Таблица 5.** Результаты численного моделирования и экспериментальных исследований модели гребного винта С  
**Table 5.** Results of numerical modeling and experimental studies of propeller model С

Экспериментальные данные									
$n$ , об/с	30								
$J$	0,402	0,63	0,712	0,816	0,926	1,017	1,106	1,153	1,210
$K_T$	0,467	0,342	0,303	0,253	0,201	0,158	0,11	0,075	0,0363
$10K_Q$	0,782	0,634	0,591	0,523	0,459	0,393	0,314	0,258	0,197
КПД	0,382	0,541	0,582	0,629	0,644	0,65	0,619	0,532	0,355
Данные эталонного расчета в ПО Star-CCM+									
$K_T$	0,48	0,3521	0,31	0,2559	0,2016	0,1541	0,1007	0,0678	0,0248
$10K_Q$	0,802	0,6577	0,6029	0,5314	0,4538	0,3803	0,2984	0,2487	0,1813
КПД	0,383	0,537	0,584	0,626	0,655	0,656	0,595	0,500	0,263
$\Delta K_T$	2,8 %	3,0 %	2,3 %	1,1 %	0,3 %	-2,5 %	-8,5 %	-9,6 %	-31,7 %
$\Delta 10K_Q$	2,6 %	3,7 %	2,0 %	1,6 %	-1,1 %	-3,2 %	-5,0 %	-3,6 %	-8,0 %
$\Delta КПД$	0,1 %	-0,4 %	0,2 %	-0,3 %	1,1 %	0,6 %	-2,4 %	-3,2 %	-9,2 %
Данные расчета в ПО «ЛОГОС»									
$K_T$	0,4629	0,3541	0,3142	0,2657	0,2130	0,1646	0,1101	0,0793	0,0380
$10K_Q$	0,7871	0,6512	0,6026	0,5400	0,4664	0,3935	0,3081	0,2613	0,2000
КПД	0,3765	0,5459	0,5926	0,6395	0,6734	0,6774	0,6302	0,5573	0,3656
$\Delta K_T$	-0,9 %	3,5 %	3,7 %	5,0 %	6,0 %	4,2 %	0,1 %	5,7 %	4,7 %
$\Delta 10K_Q$	0,7 %	2,7 %	2,0 %	3,3 %	1,6 %	0,1 %	-1,9 %	1,3 %	1,5 %
$\Delta КПД$	-0,6 %	0,5 %	1,1 %	1,1 %	2,9 %	2,7 %	1,1 %	2,5 %	1,1 %

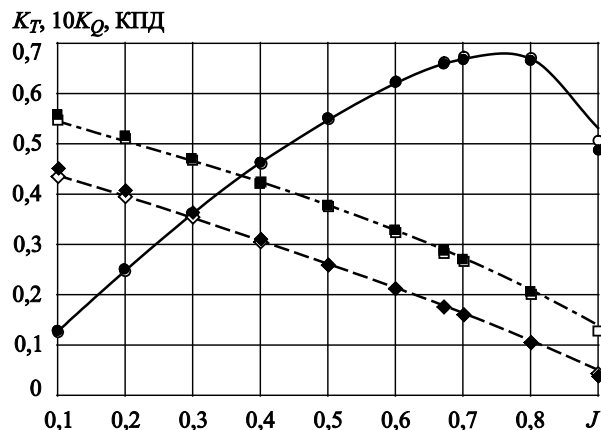
Погрешности:

$$\Delta K_T = (K_{T\text{CFD}} - K_{T\text{EXP}}) / K_{T\text{EXP}};$$

$$\Delta K_Q = (K_{Q\text{CFD}} - K_{Q\text{EXP}}) / K_{Q\text{EXP}};$$

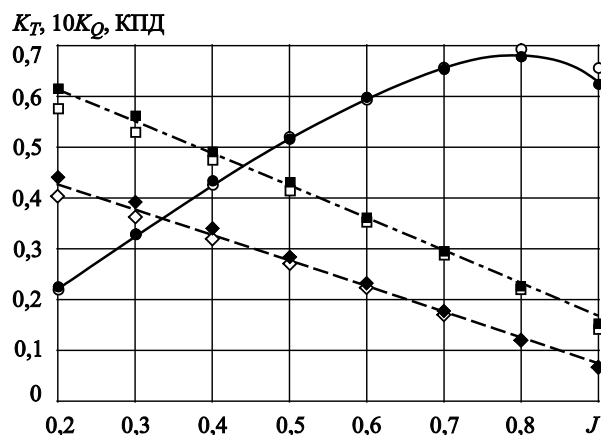
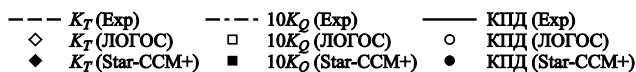
$$\Delta \text{КПД} = \text{КПД}_{\text{CFD}} - \text{КПД}_{\text{EXP}}.$$

На рис. 11 на основе визуализации  $Q$ -критерия показаны вихревые структуры за гребными винтами, полученные в результате расчета в программном модуле «ЛОГОС-Судостроение».



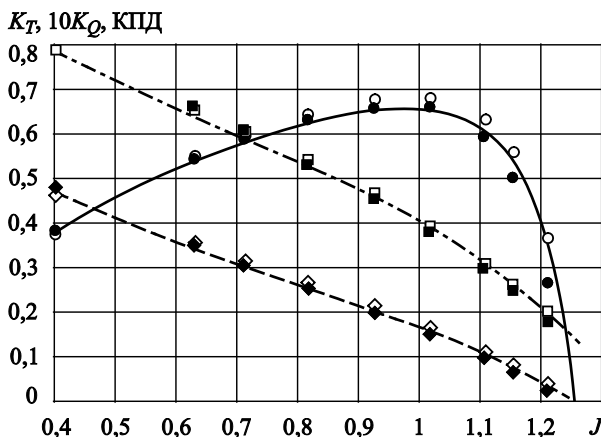
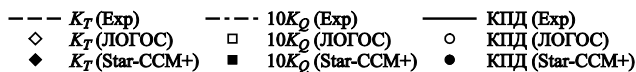
**Рис. 8.** Кривые действия модели A в условиях «свободной воды»

**Fig. 8.** Performance curves of model A in open water conditions



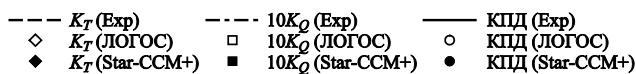
**Рис. 9.** Кривые действия модели гребного винта модели B в условиях «свободной воды»

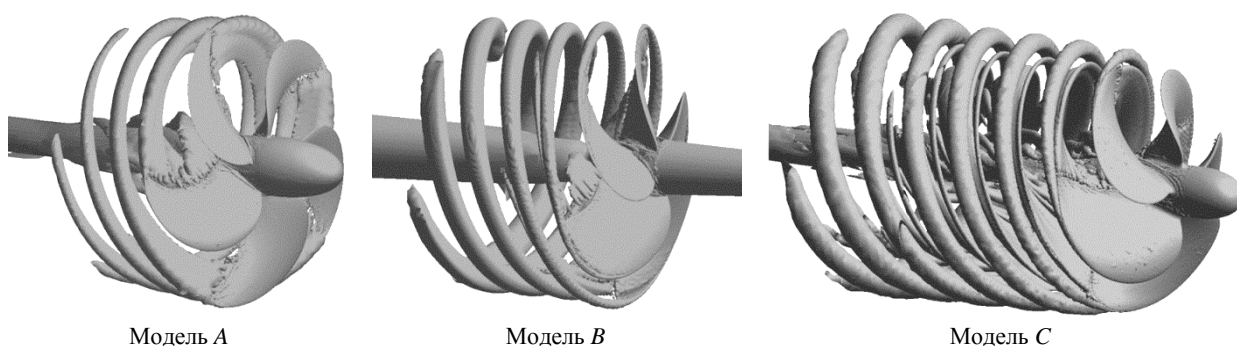
**Fig. 9.** Performance curves of the propeller model of model B in open water conditions



**Рис. 10.** Кривые действия модели гребного винта модели C в условиях «свободной воды»

**Fig. 10.** Performance curves of the propeller model of model C in open water conditions





**Рис. 11.** Вихревые структуры за гребными винтами ( $Q = 10^3 \text{ 1/c}^2$ )  
**Fig. 11.** Vortex structures behind the propellers ( $Q = 10^3 \text{ 1/s}^2$ )

**Таблица 6.** Результаты численного моделирования и экспериментальных исследований модели водометного движителя насосного типа

**Table 6.** Results of numerical modeling and experimental studies of water-jet model

Экспериментальные данные					
$n$ , об/с	15				
$J$	0,8	1,0	1,2	1,5	1,8
$K_T$	0,875	0,832	0,788	0,698	0,584
$10K_Q$	2,134	2,042	1,936	1,731	1,431
КПД	0,522	0,649	0,777	0,963	1,168
Данные эталонного расчета в ПО Star-CCM+					
$K_T$	0,888	0,843	0,797	0,714	0,607
$10K_Q$	2,176	2,070	1,970	1,784	1,533
КПД	0,520	0,6	0,773	0,955	1,134
$\Delta K_T$	1,5 %	1,2 %	1,2 %	2,2 %	3,9 %
$\Delta 10K_Q$	1,9 %	1,4 %	1,8 %	3,0 %	7,1 %
$\Delta \text{КПД}$	-0,4 %	-0,2 %	-0,5 %	-0,8 %	-2,9 %
Данные расчета в ПО «ЛОГОС»					
$K_T$	0,816	0,797	0,780	0,739	0,652
$10K_Q$	2,274	2,213	2,160	2,042	1,820
КПД	0,457	0,573	0,690	0,864	1,026
$\Delta K_T$	-6,7 %	-4,3 %	-1,0 %	5,8 %	11,7 %
$\Delta 10K_Q$	6,6 %	8,4 %	11,6 %	17,9 %	27,1 %
$\Delta \text{КПД}$	-12,5 %	-11,7 %	-11,2 %	-10,3 %	-12,2 %
Данные расчета в ПО «ЛОГОС» с расчетной сеткой из Star-CCM+					
$K_T$	0,962	0,909	0,859	0,772	0,659
$10K_Q$	2,285	2,154	2,037	1,842	1,579
КПД	0,536	0,672	0,805	1,001	1,195
$\Delta K_T$	10,0 %	9,3 %	9,1 %	10,6 %	12,9 %
$\Delta 10K_Q$	7,1 %	5,5 %	5,2 %	6,4 %	10,3 %
$\Delta \text{КПД}$	2,7 %	3,6 %	3,7 %	4,0	2,3 %



## Результаты валидации для модели водометного движителя насосного типа

Validation results for pump jet model

Решение задачи по определению гидродинамических характеристик модели ВДНТ показало, что потребности пакета программ «ЛОГОС» к вычислительным ресурсам при построении расчетной сетки очевидно превышают аналогичные требования ПО Star-CCM+.

Построение в пакете программ «ЛОГОС» расчетной сетки для ВДНТ с параметрами, обеспечивающими достаточную точность решения, на вычислительной технике Крыловского центра оказалось технически невозможным. Размерность расчетной сетки, максимально соответствующей требованиям технологии, которую удалось построить в данном пакете, составила 25,3 млн ячеек. Поэтому для ВДНТ выполнено также сравнение решателя пакета программ «ЛОГОС» с эталонными результатами ПО Star-CCM+ при использовании расчетной сетки, сгенерированной в ПО Star-CCM+ и импортированной в ПО «ЛОГОС». Размерность расчетной сетки, построенной в ПО Star-CCM+ по соответствующей методике Крыловского центра, составляет 46,8 млн ячеек.

Проведено сравнение полученных ГДХ с результатами эксперимента и результатами эталонного расчета, выполненного с использованием ПО Star-CCM+ [12]. Полученные результаты приведены в табл. 6 и на рис. 12.

Как видно из результатов расчета (табл. 6 и рис. 12), для данной задачи и при полученной в ПО «ЛОГОС» расчетной сетке программный модуль «ЛОГОС-Судостроение» сильно завышает момент рабочего колеса водометного движителя – максимальная погрешность составляет 27 %.

Использование решателя «ЛОГОС» на расчетной сетке, построенной средствами ПО Star-CCM+, позволяет значительно уменьшить погрешность определения ГДХ ВДНТ. Тем не менее погрешность определения ГДХ ВДНТ (~10 % по упору и ~7 % по моменту) при использовании решателя «ЛОГОС» несколько выше, чем аналогичная погрешность ПО Star-CCM+ (табл. 6).

## Заключение

Conclusion

В работе показано, что при использовании квалифицированным персоналом валидированных технологий численного моделирования можно с помощью отечественного пакета программ «ЛОГОС» выполнять прогнозирование гидродинамических характеристик гребных винтов с точностью, не уступающей ведущим зарубежным программным продуктам.

Полученный результат стал возможен благодаря успешному сотрудничеству ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» и ФГУП «Крыловский государственный научный центр» в процессе разработки и валидации программного модуля «ЛОГОС-Судостроение». Требуется дальнейшее развитие пакета программ «ЛОГОС» для корректного решения более сложных задач, связанных с судовыми движителями.

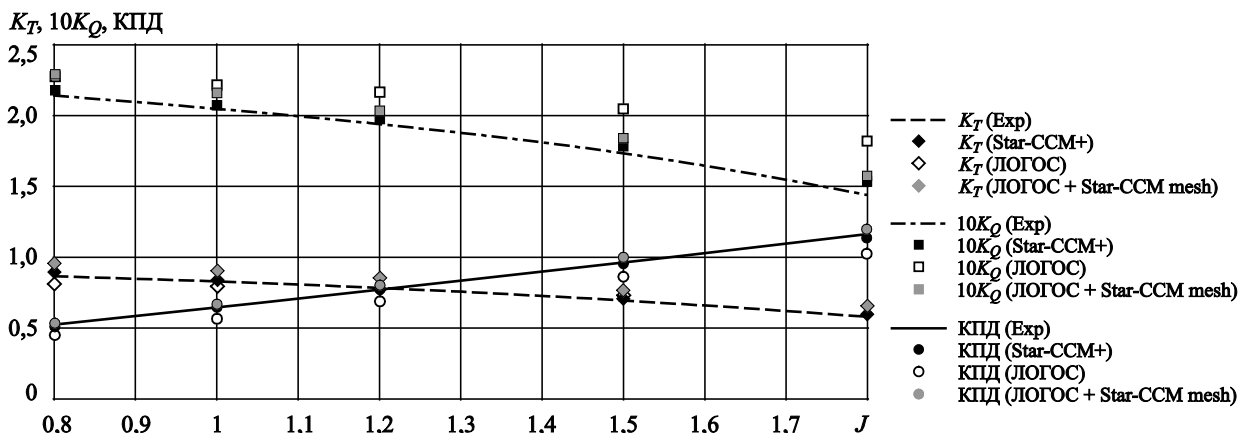


Рис. 12. Кривые действия модели водометного движителя насосного типа в условиях «свободной воды»

Fig. 12. Performance curves of the water-jet model in open water conditions

## Список использованной литературы

1. Investigation of supercomputer capabilities for the scalable numerical simulation of computational fluid dynamics problems in industrial applications / *Kozelkov A.S., Kurulin V.V., Lashkin S.V.* [et al.] // *Computational mathematics and mathematical physics*. 2016. Vol. 56, № 8. P. 1506–1516. DOI: 10.1134/S0965542516080091.
2. Mathematical simulation of hydrogen-oxygen combustion in rocket engines using LOGOS code / *Betelin V.B., Shagaliev R.M., Aksenov S.V.* [et al.] // *Acta Astronautica*. 2014. Vol. 96. P. 53–64. DOI: 10.1016/j.actaastro.2013.11.008.
3. *Kozelkov A.S.* The Numerical technique for the landslide tsunami simulations based on Navier–Stokes equations // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2016. Vol. 58, № 7. P. 1192–1210. DOI: 10.1134/S0021894417070057.
4. Валидация пакета программ «ЛОГОС» для решения задач судостроительной отрасли / *Козелков А.С., Курюлин В.В., Таранов А.Е.* [и др.] // Суперкомпьютерные дни в России: труды международной конференции. Москва : МАКС Пресс, 2021. С. 62–73.
5. *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. Vol. 9, № 6. P. 655–667. DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2017.02.006.
6. URL: [http://www.nmri.go.jp/institutes/fluid\\_performance\\_evaluation/cfd\\_rd/cfdws15/file/Geometry\\_IGES\\_files/kcs/KP505.zip](http://www.nmri.go.jp/institutes/fluid_performance_evaluation/cfd_rd/cfdws15/file/Geometry_IGES_files/kcs/KP505.zip) (дата обращения: 20.03.2022).
7. Легконагруженный водометный движитель : пат. 2537351 Рос. Федерация / *С.А. Александров, Г.И. Каневский, С.В. Капранцев, А.В. Пустошный*. № 2013121166/11; заявл. 07.05.2013; опубл. 10.01.2015, Бюл. № 1. 8 с.
8. *Menter F.R.* Two equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // *AIAA Journal*. 1994. Vol. 32, № 8. P. 1598–1605. DOI: 10.2514/3.12149.
9. Correlation-based transition model using local variables. Part 1: Model Formulation / *Menter F.R., Langtry R.B., Likki S.R.* [et al.] // *Journal of Turbomachinery*. 2006. Vol. 128, № 3. P. 413–422. DOI: 10.1115/1.2184352.
10. *Taranov A., Lobachev M.* Influence of the laminar-turbulent transition on the accuracy of the propeller characteristics prediction in the model scale // 2015 International Conference on Mechanics – Seventh Polyakhov's Reading : [Proceedings]. Piscataway : IEEE, 2015. P. 243–246. DOI: 10.1109/Polyakhov.2015.7106783.
11. *Taranov A.E.* Определение локальных и интегральных гидродинамических характеристик контейнеровоза в цифровом бассейне // Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. Вып. 3(389). С. 73–82. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-3-389-73-82.
12. *Лобачев М.П., Рудниченко А.А.* Расчетное определение начала кавитации рабочего колеса водометного движителя насосного типа // Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. Вып. 3(389). С. 63–72. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-3-389-63-72.

## References

1. Investigation of supercomputer capabilities for the scalable numerical simulation of computational fluid dynamics problems in industrial applications / *A.S. Kozelkov, V.V. Kurulin, S.V. Lashkin* [et al.] // *Computational mathematics and mathematical physics*. 2016. Vol. 56, No. 8. P. 1506–1516. DOI: 10.1134/S0965542516080091.
2. Mathematical simulation of hydrogen-oxygen combustion in rocket engines using LOGOS code / *V.B. Betelin, R.M. Shagaliev, S.V. Aksenov* [et al.] // *Acta Astronautica*. 2014. Vol. 96. P. 53–64. DOI: 10.1016/j.actaastro.2013.11.008.
3. *Kozelkov A.S.* The Numerical technique for the landslide tsunami simulations based on Navier–Stokes equations // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2016. Vol. 58, No. 7. P. 1192–1210. DOI: 10.1134/S0021894417070057.
4. Validation of the LOGOS software package for solving the problems of the shipbuilding industry / *A.S. Kozelkov, V.V. Kurulin, A.E. Taranov* [et al.] // Supercomputer days in Russia: Proceedings of the International conference. Moscow : MAKS Press, 2021. P. 62–73 (*in Russian*).
5. *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. Vol. 9, No. 6. P. 655–667. DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2017.02.006.
6. URL: [http://www.nmri.go.jp/institutes/fluid\\_performance\\_evaluation/cfd\\_rd/cfdws15/file/Geometry\\_IGES\\_files/kcs/KP505.zip](http://www.nmri.go.jp/institutes/fluid_performance_evaluation/cfd_rd/cfdws15/file/Geometry_IGES_files/kcs/KP505.zip) (Accessed: 20.03.2022) (*in Russian*).
7. Lightly loaded water jet : пат. 2537351 Рос. Federation / *С.А. Александров, Г.И. Каневский, С.В. Капранцев, А.В. Пустошный*. No. 2013121166/11; application 07.05.2013; publ. 10.01.2015, Bul. No. 1. 8 p. (*in Russian*).
8. *Menter F.R.* Two equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // *AIAA Journal*. 1994. Vol. 32, No. 8. P. 1598–1605. DOI: 10.2514/3.12149.
9. Correlation-based transition model using local variables. Part 1: Model Formulation / *F.R. Menter, R.B. Langtry, S.R. Likki* [et al.] // *Journal of Turbomachinery*. 2006. Vol. 128, No. 3. P. 413–422. DOI: 10.1115/1.2184352.
10. *Taranov A., Lobachev M.* Influence of the laminar-turbulent transition on the accuracy of the propeller

characteristics prediction in the model scale // 2015 International Conference on Mechanics – Seventh Polyakhov's Reading : [Proceedings]. Piscataway : IEEE, 2015. P. 243–246. DOI: 10.1109/Polyakhov.2015.7106783.

11. *Taranov A.E.* Determination of local and integral hydrodynamic characteristics of a container ship in a digital basin // Transactions of Krylov State Research Centre. 2019. Vol. 3(389). P. 73–82. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-3-389-73-82 (*in Russian*).
12. *Lobachev M.P., Rudnichenko A.A.* Estimated determination of pump jet impeller cavitation inception // Transactions of Krylov State Research Centre. 2019. Vol. 3(389). P. 63–72. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-3-389-63-72 (*in Russian*).

---

### Сведения об авторах

*Таранов Андрей Евгеньевич*, к.т.н., начальник отделения математического моделирования и суперкомпьютерных технологий ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург,

Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 748-63-19. E-mail: AE\_Taranov@ksrc.ru. <https://orcid.org/0000-0002-1325-3838>.

*Кузнецова Анна Владимировна*, инженер 1-й категории отдела математического моделирования ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 748-63-19. E-mail: a\_kuznetsova@ksrc.ru. <https://orcid.org/0000-0002-0256-9423>.

### About the authors

*Andrey Ye. Taranov*, Cand. Sci. (Eng), Head of Mathematical Modeling and Supercomputer Technologies Department, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 748-63-19. E-mail: AE\_Taranov@ksrc.ru. <https://orcid.org/0000-0002-1325-3838>.

*Anna V. Kuznetsova*, 1<sup>st</sup> Category Engineer of Mathematical Modeling and Supercomputer Technologies Department, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 748-63-19. E-mail: a\_kuznetsova@ksrc.ru. <https://orcid.org/0000-0002-0256-9423>.

Поступила / Received: 08.02.22  
Принята в печать / Accepted: 27.06.22  
© Кузнецова А.В., Таранов А.Е., 2022