



DOI: 10.24937/2542-2324-2022-3-401-19-27
УДК 629.5.017

С.А. Александров , Г.И. Каневский 
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАСШТАБНОГО ЭФФЕКТА НА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ХОДОВЫЕ КАЧЕСТВА ДВУХВАЛЬНОГО ГРУЗОПАССАЖИРСКОГО СУДНА

Объект и цель научной работы. Объектом исследования является влияние масштабного эффекта на ходовые качества современных грузопассажирских судов. Цель – оценка влияния масштабного эффекта на ходовые качества двухвального грузопассажирского судна (ГПС).

Материалы и методы. Предлагается метод прогнозирования ходовых качеств судна по результатам испытаний его модели. Указанный метод работоспособен для одновальных и двухвальных судов.

Основные результаты. Показано, что предлагаемый метод прогнозирования ходовых качеств судна по результатам испытаний его модели по своим качествам близок к лучшим методам прогнозирования ходовых качеств одновального судна. Использование рассматриваемого метода не приводит к парадоксам при его применении для двухвальных ГПС. С применением данного метода выполнены расчеты ходовых качеств таких судов.

Заключение. Учет влияния масштабного эффекта на ходовые качества двухвального ГПС с выкружками для крепления гребных винтов не приводит к изменению прогнозируемой величины скорости хода.

Ключевые слова: прогнозирование ходовых качеств судна, масштабный эффект, метод расчета ходкости, МКОБ.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-3-401-19-27
UDC 629.5.017

S.A. Aleksandrov , G.I. Kanevsky 
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

INVESTIGATION OF SCALE EFFECT ON HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS AND PROPULSION PERFORMANCE OF TWIN-SHAFT CARGO/PASSENGER VESSEL

Object and purpose of research. The object of investigation is the scale effect on propulsion performance of modern cargo/passenger vessels. The purpose is to estimate the scale effect on propulsion performance of a twin-shaft cargo/passenger vessel (CPV).

Materials and methods. A method is suggested for predicting the ship propulsion performance based on model test data. This method works for single- and twin-shaft vessels.

Для цитирования: Александров С.А., Каневский Г.И. Исследование влияния масштабного эффекта на гидродинамические характеристики и ходовые качества двухвального грузопассажирского судна. Труды Крыловского государственного научного центра. 2022; 3(401): 19–27.

For citations: Aleksandrov S.A., Kanevsky G.I. Investigation of scale effect on hydrodynamic characteristics and propulsion performance of twin-shaft cargo/passenger vessel. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2022; 3(401): 19–27 (in Russian).

Main results. The method suggested for ship performance prediction based on model tests is shown to have a similar quality as compared to the best techniques for performance prediction of single-shaft ships. Application of this method to twin-shaft vessels does not lead to paradox situations. Propulsion performance of twin-shaft CPV are calculated using this technique.

Conclusion. Inclusion of the scale effect on propulsion performance of a twin-shaft CPV with bossings for propellers does not cause any changes in the predicted speed.

Keywords: predicted propulsion performance of ship, scale effect, prediction method of propulsion performance, ИТТС.

The authors declare no conflicts of interest.

Введение

Introduction

В 1978 г. Пропульсивный комитет Международной конференции опытовых бассейнов (МКОБ) разработал рекомендации по учету масштабного эффекта при прогнозировании ходовых качеств одновальных судов по результатам модельных испытаний. Эти рекомендации с небольшими изменениями используются до сих пор [1, 2], их принято называть методом МКОБ-78.

Данный метод хорошо себя зарекомендовал при прогнозировании ходовых качеств одновальных транспортных судов. В период его разработки указанные суда имели V -образную или U -образную формы шпангоутов кормовой оконечности. При этом превалировало мнение о получении выигрыша по ходкости судна за счет увеличения коэффициента попутного потока.

К настоящему времени пришло понимание, что на создание попутного потока тратится энергия, а это приводит к росту буксировочного сопротивления судна. Современные транспортные суда в основном имеют батоксную форму обводов кормовой оконечности, что приводит к уменьшению буксировочного сопротивления, а также резкому снижению коэффициента попутного потока. Величина коэффициента засасывания t , таким образом, использование метода МКОБ-78 начинает приводить к парадоксальным результатам. В натуральных условиях коэффициент попутного потока оказывается больше его величины в модельных условиях.

Сложной также представляется ситуация с определением буксировочного сопротивления. Применение гипотезы аффинности привело к появлению корреляционных коэффициентов C_p и C_n , отличных от единицы. Определение величины формфактора и коэффициентов C_p и C_n становится актуальной проблемой при прогнозировании ходовых качеств одновальных и двухвальных судов. Это означает, что достаточно точного метода прогнози-

рования ходовых качеств транспортных судов практически нет. Предложения по применению суперкомпьютерных технологий для прямого прогнозирования буксировочного сопротивления нуждаются в тщательной проверке их достоверности.

Эти факты привели к тому, что гидродинамические центры вводят понятие формфактора, который определяется по разным формулам для различных типов судов. Это говорит о кризисной ситуации в разработке полноценных методов прогнозирования ходовых качеств судов.

Таким образом, несмотря на то, что изучению влияния масштабного эффекта на гидродинамические характеристики и ходовые качества судов посвящено большое количество публикаций [3, 7, 9, 10–17], этот вопрос до сих пор остается актуальным. В этой связи разработка метода прогнозирования ходовых качеств одновальных и двухвальных судов, свободного от указанных недостатков, представляется очень важной.

Метод прогнозирования ходовых качеств судов по результатам испытаний их моделей

Method for predicting the ship propulsion performance based on tests on her models

Метод прогнозирования ходовых качеств судов по результатам испытаний их моделей включает следующие составляющие:

- определение буксировочного сопротивления судна;
- оценка влияния масштабного эффекта на характеристики гребных винтов;
- оценка влияния масштабного эффекта на коэффициенты взаимодействия гребного винта (ГВ) с корпусом.

Далее приводится подробное описание составляющих предлагаемого метода прогнозирования ходовых качеств судов по результатам испытаний их моделей.

Метод определения буксировочного сопротивления судна

Согласно схеме Фруда [2] коэффициент полного сопротивления судна C_T может быть представлен в виде суммы составляющих:

$$C_T = C_R + C_{F0} + C_A + C_{AP},$$

где C_R – коэффициент остаточного сопротивления судна; C_{F0} – коэффициент сопротивления трения эквивалентной плоской пластины, определяемый по формуле Прандтля – Шлихтинга [8];

$$C_{F0} = 0,455/(\lg(\text{Rn}))^{2,58},$$

Rn – число Рейнольдса, определяемое по длине судна по ватерлинии L_{WL} ; C_A – коэффициент корреляционного сопротивления (надбавка на шероховатость); C_{AP} – коэффициент сопротивления выступающих частей, определяемый по данным испытаний модели судна.

В соответствии с основной идеей схемы Фруда $C_R = C_{Rm}$, где C_{Rm} – коэффициент остаточного сопротивления модели судна. Приведенное допущение, по-видимому, является приближенным. На основании результатов натурных испытаний, приведенных в статье [9], следует, что это допущение является достаточно достоверным, а схемой Фруда можно пользоваться в практических приложениях.

Представленный метод расчета буксировочного сопротивления судна замыкается зависимостью коэффициента корреляционного сопротивления C_A от длины по ватерлинии L_{WL} , приведенной на рис. 1. Здесь сплошной линией представлена зависимость коэффициента корреляционного сопротивления от длины по ватерлинии L_{WL} : $C_A = C_A(L_{WL})$ [12]. Вариации величины C_A составляют от $+0,4 \times 10^{-3}$ до $-0,2 \times 10^{-3}$ при изменении длины L_{WL} от 50 до 500 м.

Данная зависимость была предложена В.М. Штумпфом в работе [12] и может быть аппроксимирована следующей формулой

$$C_A = (8E - 09L_{WL}^3 - 5E - 06L_{WL}^2 - 0,001L_{WL} + 0,5912) \times 10^{-3}.$$

В предлагаемом методе прогнозирования ходовых качеств судов по результатам испытаний их моделей несколько лучшее согласование с данными натурных испытаний одновальных судов получается, если величину коэффициента корреляционного сопротивления C_A , принятую в [12], уменьшить на $0,1 \times 10^{-3}$. Полученная таким образом зависимость приведена на рис. 1 пунктирной линией. Эта зависимость может быть аппроксимирована соотношением

$$C_A = (8E - 09L_{WL}^3 - 5E - 06L_{WL}^2 - 0,001L_{WL} + 0,4912) \times 10^{-3}.$$

Представленный метод расчета буксировочного сопротивления применим для всех типов судов: одновальных, двухвальных и многовальных.

По известному значению коэффициента полного сопротивления C_T величина буксировочного сопротивления может быть рассчитана с помощью соотношения

$$R_T = C_T \times \rho \times \frac{V^2}{2} \times S.$$

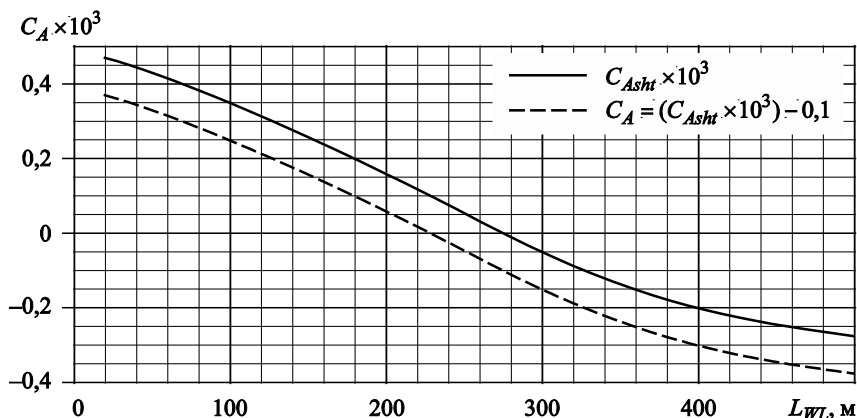
В этом соотношении V – скорость хода судна, м/с, ρ – плотность морской воды, кг/м³, S – смоченная поверхность судна, м².

Метод оценки влияния масштабного эффекта на характеристики гребных винтов

В предлагаемом методе использована модернизированная версия метода эквивалентного профиля,

Рис. 1. Зависимость коэффициента корреляционного сопротивления C_A от длины судна L_{WL}

Fig. 1. Correlation resistance coefficient C_A versus ship length L_{WL}



разработанного Лербсом [4] в 1951 г. Модернизация связана с одновременным учетом изменения коэффициентов подъемной силы и сопротивления эквивалентного профиля. Для модернизации использована актуальная на тот момент информация о влиянии вязкости и шероховатости на гидродинамические характеристики профилей бесконечного размаха.

Статья Лербса является одной из основных работ, посвященных указанной проблеме [4]. Автор использовал следующие предположения:

- при интегрировании тяги винта по радиусу применяется теорема о среднем и вводится понятие эквивалентного безразмерного радиуса;
- тяге гребного винта предлагается равномерно распределяться по диску ГВ;
- распределение циркуляции вдоль лопасти близко к оптимальному, т.е. значение индуктивной поступи λ_i не зависит от безразмерного радиуса \bar{r} .

Работа винта с использованием этих трех допущений может быть упрощена до работы одного профиля, расположенного на эквивалентном радиусе \bar{r}_0 . Вместо зависимостей K_T и K_Q от поступи $J = V_0/nD$ можно получить зависимости коэффициента подъемной силы C_1 и коэффициента сопротивления C_d эквивалентного профиля от угла атаки α . Здесь V_0 – скорость обтекания гребного винта, м/с; n – число оборотов ГВ, 1/с, D – диаметр ГВ, м.

Лербс считал, что для учета эффекта масштаба достаточно изменить коэффициент сопротивления C_d , а затем определить новые значения K_T и K_Q . В 1978 г. формулы данного метода были аппроксимированы приближенными соотношениями, которые принято называть методом ИТТС-78 [1] для расчета масштабного эффекта гидродинамических характеристик гребного винта.

В настоящее время известно значительное количество методов расчета гидродинамических характеристик ГВ с произвольной геометрией лопастей [5]. Результаты, полученные таким способом, отличаются от данных [1, 2]. Испытания гребного винта при натуральных числах Рейнольдса $Rn \approx 10^7$ до сих пор не проводились в связи с рядом технических трудностей. Поэтому сложно проверить правильность метода расчета путем сравнения результатов прогнозирования с экспериментальными данными.

Применение метода ИТТС-78 [1] позволяет правильно прогнозировать изменение эффективности η_0 . В то же время изменение коэффициента упора K_T и коэффициента момента K_Q прогнозируется неудовлетворительно.

В 1973 г. был предложен метод расчета влияния эффекта масштаба [7], который одновременно учитывает вариации C_d , C_1 и α . Никаких рекомендаций по определению изменений C_d и C_1 предложено не было.

В предлагаемом методе [18] для определения изменения коэффициента сопротивления эквивалентного профиля используется соотношение $\Delta C_d = C_{dr} - C_{dsm}$. Здесь индексом sm отмечены значения, относящиеся к гладкой поверхности модели, а индексом r – значения, относящиеся к шероховатой поверхности натурального гребного винта.

В методе [18] модель гребного винта считается гидродинамически гладкой, и для определения коэффициента сопротивления эквивалентного профиля используется формула [6]

$$C_{dsm} = [1 + 2,3(\delta + 0,76\delta_c)] \frac{0,05073}{Rn_0^{0,138}}.$$

Здесь $\delta = e/c$ – относительная толщина сечения лопасти на эквивалентном радиусе; $\delta_c = e_c/c$ – относительная кривизна сечения лопасти на эквивалентном радиусе; e , e_c – толщина и кривизна участка лопасти эквивалентного радиуса, м; c – длина хорды участка лопасти эквивалентного радиуса, м; Rn_0 – число Рейнольдса участка лопасти эквивалентного радиуса.

Лопастей натурального гребного винта предполагаются покрытыми катодным осадком с высотным параметром шероховатости $R_a = 3$ мкм. Высотный параметр R_a определяется с помощью профилограммы поверхности с учетом соотношения

$$R_a = \frac{l}{l_p} \int_0^{l_p} |y| dx,$$

где l_p – длина профилограммы шероховатой поверхности, м; y – ордината профилограммы, м; x – продольная координата профилограммы, м.

Значение безразмерного высотного параметра определяется соотношением $\tilde{R}_a \cong R_a / c \times 10^6$.

Для определения коэффициента сопротивления эквивалентного профиля, покрытого катодным осадком, в натуральных условиях используются формулы [6]

$$\left. \begin{aligned} Rn_1 &= 1,48 \times 10^6 \times \tilde{R}_a^{-0,56} \\ Rn_2 &= 3,14 \times 10^6 \times \tilde{R}_a^{-0,196} \\ Rn_3 &= 1,339 \times 10^8 \times \tilde{R}_a^{-1,196} \end{aligned} \right\}$$

$C_{dr} = C_{dsm}$ при $Rn_0 < Rn_1$;

$$C_{dr} = C_{drm}(\text{Rn}_1) * \left[\frac{C_{drl}(\text{Rn}_2)}{C_{drm}(\text{Rn}_1)} \right]^{\frac{\lg(\text{Rn}_0/\text{Rn}_1)}{\lg(\text{Rn}_2/\text{Rn}_1)}}$$

при $\text{Rn}_1 < \text{Rn}_0 < \text{Rn}_2$;

$$C_{dr} = C_{dl} = [1 + 2,3(\delta + 0,76\delta_c)] \times \\ \times [0,05073\text{Rn}_0^{-0,138} + 3,514 \times 10^{-7} \text{Rn}_0^{0,44} \tilde{R}_a^{0,759}]$$

при $\text{Rn}_2 < \text{Rn}_0 < \text{Rn}_3$;

$$C_{dr} = [1 + 2,3(\delta + 0,76\delta_c)] \times 0,00517 \tilde{R}_a^{0,165}$$

при $\text{Rn}_0 > \text{Rn}_3$.

Следующие соотношения были использованы для определения величины ΔC_1

$$\Delta C_1 = C_{lr} - C_{lsm},$$

где для сечения лопасти на эквивалентном радиусе из [6] следуют соотношения:

$$C_{lsm} = 2\pi \mu_{sm} * \left[\frac{\varphi - \beta_i - (e_0 - D)k_{dT}}{k_\alpha} + \frac{2k_{sm}\delta_c}{k_c} \right],$$

$$C_{lr} = 2\pi \mu_{r*} \left[\frac{\varphi - \beta_i - (e_0 - D)k_{dT}}{k_\alpha} + \frac{2k_r\delta_c}{k_c} \right].$$

Здесь k_c , k_{dt} , k_α – поправки Моргана на работу эквивалентного профиля в составе решетки; e_0 – гипотетическая толщина лопасти в оси винта, м; φ – угол наклона эквивалентного сечения лопасти.

$$\text{tg}\varphi = \frac{P}{D} \frac{1}{\pi \bar{r}_0},$$

где β_i – наведенный угол потока в эквивалентном сечении лопасти

$$\text{tg}\beta_i = \lambda_i / \bar{r}_0.$$

Поправки на вязкость потока μ_{sm} , μ_r , k_{sm} и k_r определяются соотношениями [6]:

$$\mu_{sm} = (1 + 0,87\delta) \times \\ \times [1 - \exp(-0,0691 + 12,46\delta - 0,1855 \ln \text{Rn}_0)],$$

$$k_{sm} = 1,015[1 + \delta(\delta - 0,05)/(0,04664 \ln \text{Rn}_0 - 0,4378)^2],$$

$$\frac{\mu_r}{\mu_{sm}} = 1 - (0,1151\delta + 0,003706)(\tilde{R}_a - 0,3)^{0,32456},$$

$$\frac{k_r}{k_{sm}} = 1 - (9,533 \times 10^{-3} \lg \text{Rn}_0 - 0,0566)(\tilde{R}_a - 0,3)^{0,42016}.$$

Предлагаемый метод оценки влияния масштабного эффекта на гидродинамические характеристики гребных винтов дает величину изменения эффективности η_0 , весьма близкую к прогнозируемой по методу МКОБ-78. Однако увеличение η_0 происходит за счет заметного роста коэффициента упора K_T и заметного уменьшения коэффициента момента K_Q . В методе МКОБ-78 изменение коэффициента упора K_T пренебрежимо мало.

Метод оценки влияния масштабного эффекта на коэффициенты взаимодействия гребных винтов с корпусом

Используемый в данной работе метод оценки влияния масштабного эффекта на коэффициенты взаимодействия ГВ с корпусом подробно изложен в статье [9]. Согласно этому методу в ходе проведения самоходных испытаний модели судна определяются следующие зависимости:

1. Зависимость коэффициента попутного потока в модельных условиях w_m от коэффициента нагрузки по полезному упору K_{DE}

$$w_m = w_m(K_{DE}),$$

$$\text{где } K_{DE} = V \cdot D : \sqrt{R_T / \rho}.$$

2. Зависимость коэффициента засасывания в модельных условиях t_m от коэффициента нагрузки

$$t_m = t_m(K_{DEe}).$$

3. Зависимость коэффициента влияния неравномерности на момент i_{Qm} от коэффициента нагрузки K_{DE}

$$i_{Qm} = i_{Qm}(K_{DE}).$$

После выполнения значительного числа научно-исследовательских работ к настоящему времени наиболее широкое распространение получили следующие гипотезы: $t = t_m$; $i_Q = i_{Qm}$; $w \neq w_m$.

Таким образом, на натурные условия можно без изменения перенести величины t и i_Q , а для изменения величины w_m при переходе к натуре предложено множество различных соотношений. В данной работе принята линейная зависимость [9]

$$w = w_m \cdot \left(0,6 \cdot \frac{C_V}{C_{Vm}} + 0,4 \right),$$

где C_V – коэффициент вязкостного сопротивления, определяемый соотношением

$$C_V = C_{Fo} \cdot (1 + k) + 0,4 \times 10^{-3};$$

C_{Vm} – коэффициент вязкостного сопротивления модели

$$C_{Vm} = C_{Fom} (1 + k);$$

k – формфактор, значение которого здесь рассчитывается по формуле

$$k = \frac{C_R(0,1)}{C_{Fom}(0,1)},$$

$C_R(0,1)$, $C_{Fom}(0,1)$ – коэффициенты, определяемые при $Fn = 0,1$.

В предлагаемом методе прогнозирования ходовых качеств судна по результатам испытаний его модели используется линейная формула для одновальных и двухвальных судов.

Таблица 1. Значения корреляционных коэффициентов C_p и C_n

Table 1. Values of correlation coefficients C_p and C_n

№ п/п	№ проекта	Предлагаемый метод		Метод МКОБ-78	
		C_p	C_n	C_p	C_n
1	1552	1,009	0,980	1,007	0,984
2	1585	1,034	0,981	1,021	0,998
3	1568	0,887	0,927	0,857	0,938
4	1594	1,049	1,075	1,071	1,079
5	13490	1,025	1,011	0,903	0,982.
6	15640	0,875	0,998	0,856	0,999
7	13476	1,037	1,001	0,999	1,001
8	12990	1,042	1,021	1,020	1,024
	\bar{C}	0,995	0,999	0,967	1,000
	$ \Delta $	0,054	0,0277	0,063	0,0254

Таблица 2. Главные размерения двухвального грузопассажирского судна

Table 2. Principal dimensions of twin-shaft cargo/passenger vessel

Длина судна между перпендикулярами, м	$L_{PP} = 185$
Длина судна по ватерлинии, м	$L_{WL} = 186$
Ширина судна, м	$B = 36,95$
Осадка судна носом, м	$T_F = 6,8$
Осадка судна кормой, м	$T_A = 7,5$
Объемное водоизмещение судна, м ³	$V = 35\,232$
Смоченная поверхность судна, м ²	$S = 8080$

Тестирование предлагаемого метода прогнозирования

Testing of the suggested prediction method

С целью тестирования указанного метода прогнозирования ходовых качеств судов по результатам испытаний их моделей были выполнены расчеты для восьми проектов одновальных транспортных судов, по которым имеются достоверные данные натурных испытаний.

Оценка качества прогноза проводилась путем сравнения прогнозируемых значений мощности и частоты вращения вала с натурными данными при полученной на натуре скорости хода. В качестве критерия рассматривалась близость к единице значений корреляционных коэффициентов:

$$C_p = P_{S \text{ прогноз}} / P_{S \text{ натура}};$$

$$C_n = n_{\text{прогноз}} / n_{\text{натура}}.$$

Результаты расчетов приведены в табл. 1.

В таблице приведены значения корреляционных коэффициентов C_p и C_n для каждого из восьми проектов, а также их среднее значение \bar{C} и дисперсия $|\Delta|$. Кроме результатов расчетов по предлагаемому методу, приводятся данные, полученные по методу МКОБ-78.

Анализируя полученные результаты расчетов, можно отметить, что качество прогноза по предлагаемому методу весьма близко к качеству прогноза по методу МКОБ-78 для одновальных судов. Однако, в отличие от МКОБ-78, предлагаемый метод прогнозирования ходовых качеств судна работоспособен и свободен от парадоксов для одновальных и двухвальных судов.

Пример расчета ходовых качеств двухвального грузопассажирского судна

Case study: propulsion performance estimation for twin-shaft CPV

Для оценки влияния масштабного эффекта выполнено два расчета ходкости для двухвального грузопассажирского судна: с учетом масштабного эффекта и без него. Оценка масштабного эффекта выполнялась с использованием предлагаемого метода прогнозирования ходовых качеств судов.

В табл. 2 приведены главные размерения двухвального ГПС с гребными винтами, закрепленными на выкружках.

Расчеты выполнялись при суммарной мощности главных двигателей грузопассажирского судна

$P_S = 24\,000$ кВт. Результаты расчетов безразмерных гидродинамических характеристик приведены в табл. 3. Расчетные значения скорости хода и числа оборотов гребных винтов указаны в табл. 4.

Анализируя приведенные в табл. 3 и 4 данные, можно отметить, что для двухвального грузопассажирского судна с гребными винтами, закрепленными на выкружках, учет масштабного эффекта приводит к увеличению КПД ГВ в свободной воде и уменьшению коэффициента влияния корпуса. При этом значение пропульсивного коэффициента практически не изменяется. В итоге учет масштабного эффекта не приводит к изменению прогнозируемой скорости хода. С учетом масштабного эффекта расчетное значение числа оборотов увеличивается в данном случае на 1 об/мин.

Заключение

Conclusion

Предложен метод прогнозирования ходовых качеств одновальных и двухвальных судов по результатам испытаний их моделей. Данный метод обеспечивает высокое качество прогнозирования ходовых качеств одновальных судов, сопоставимое с лучшими известными методами.

Метод свободен от парадоксов, возникающих при обобщении методов прогнозирования для одновальных судов на двухвальные суда. Для двухвального ГПС с гребными винтами, закрепленными на выкружках, учет влияния масштабного эффекта при прогнозировании ходовых качеств не приводит к изменению прогнозируемой величины скорости хода.

Список использованной литературы

1. ИТТС : Recommended Procedures and Guidelines : 7.5–02–03–1.4. 1978 ИТТС Performance Prediction Method : Rev. 04 / Ed. Propulsion Committee of the 28th ИТТС. [S. 1.], 2017. 15 p.
2. Справочник по теории корабля : в 3 т. Т. 1: Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые двигатели / [Я.И. Войткунский и др.]. Ленинград : Судостроение, 1985. 764 с.
3. Каневский Г.И., Клубничкин А.М., Сазонов К.Е. Прогнозирование характеристик ходкости многовальных судов. Санкт-Петербург : Крыловский гос. научный центр, 2019. 160 с.
4. Lerbs H.W. On the Effects of Scale and Roughness on Free Running Propellers // Journal of the American Society of Naval Engineers. 1951. Vol. 63, № 1. P. 58–94. DOI: 10.1111/j.1559-3584.1951.tb02878.x.
5. Proceedings of the 22nd ИТТС Propulsion Committee Propeller RANS/Panel Method Workshop / Ed. B. Gindroz, T. Hoshino, J. Pylkkanen. Grenoble, 1998.
6. Мишкевич В.Г. Развитие методов вихревой теории применительно к задачам проектирования движителей морских судов с целью снижения их энергоемкости : дис. ... д-ра техн. наук : 05.08.01. Ленинград, 1986. 553 с.
7. Каневский Г.И., Пустошный А.Ф. Масштабный эффект гидродинамических характеристик гребных винтов // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 1973. Вып. 276: Вопросы гидродинамики транспортных судов. С. 62–78.

Таблица 3. Результаты расчетов для двухвального грузопассажирского судна при подводимой мощности $P_S = 24\,000$ кВт

Table 3. Estimated results for twin-shaft cargo/passenger vessel at delivered power $P_S = 24\,000$ kW

	Без учета масштабного эффекта	С учетом масштабного эффекта
Попутный поток w_s	0,215	0,166
Коэффициент засасывания t	0,184	0,184
Коэффициент влияния на крутящий момент	1	1
Поступь ГВ в свободной воде J_o	0,655	0,691
Коэффициент упора ГВ K_{Tos}	0,292	0,289
Коэффициент момента ГВ K_{Qos}	0,0546	0,0536
КПД гребного винта η_o	0,557	0,593
Коэффициент влияния корпуса η_H	1,038	0,977
Пропульсивный коэффициент η	0,567	0,568

Таблица 4. Расчетные значения частоты вращения гребного винта и скорости хода при подводимой мощности $P_S = 24\,000$ кВт

Table 4. Estimated propeller RPM and speed at delivered power $P_S = 24\,000$ kW

	n , об/мин	V_S , уз
Без учета масштабного эффекта	135,6	16,90
С учетом масштабного эффекта	134,7	16,89

8. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. Москва : Наука, 1974. 711 с.
9. Развитие методов прогнозирования ходовых качеств транспортных судов / В.О. Борусевич, Г.И. Каневский, С.В. Капранцев [и др.] // Труды Крыловского гос. науч. центра. 2017. Вып. 4(382). С. 21–28.
10. Описание статистического метода Холтропа оценки ходкости кораблей и морских судов : техн. отчет / ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. Санкт-Петербург, 2001. № 41106.
11. Ротта И.К. Турбулентный пограничный слой в несжимаемой жидкости. Ленинград : Судостроение, 1967. 231 с.
12. Кацман Ф.М., Пустошный А.Ф., Штумпф В.М. Пропульсивные качества морских судов. Ленинград : Судостроение, 1972. 510 с.
13. Метод анализа влияния шероховатости на гидродинамические характеристики поверхности корпуса / В.В. Дробленков, Г.И. Каневский, В.М. Штумпф, В.Н. Щердин // Вопросы судостроения. Серия: Проектирование судов. 1977. Вып. 15. С. 56–62.
14. Влияние шероховатости наружной обшивки корпуса на сопротивление транспортных судов / Л.Н. Душина, Г.И. Каневский, В.М. Штумпф, В.Н. Щердин // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 1981. Вып. 287: Сборник статей по гидродинамике транспортных судов. С. 53–61.
15. Каневский Г.И., Лобачев М.П. Исследование влияния состояния лопастей гребных винтов на их гидродинамические характеристики. Вопросы судостроения. Серия: Проектирование судов. 1984. Вып. 41. С. 57–62.
16. Пустошный А.В., Сверчков А.В., Шевцов С.П. Влияние шероховатости поверхности гребного винта на его пропульсивные характеристики // Труды Крыловского гос. науч. центра. 2019. Вып. 4(390). С. 11–26. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-4-390-11-26.
17. Влияние масштабного эффекта на гидродинамические характеристики гребных винтов ледоколов и ледовых транспортных судов / Г.И. Каневский, А.М. Клубничкин, А.Л. Попов, К.Е. Сазонов // Труды Крыловского гос. науч. центра. 2020. Вып. 2(392). С. 24–35. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-2-392-24-35.
18. Kanevsky G.I., Kruglova S.N. The scale effect influence on hydrodynamic characteristics of propellers // Lavrentiev Lectures : Proceedings of International Symposium on Ship Propulsion (SP 2001). St.-Petersburg : St.-Petersburg State Marine Technical Univ., 2001. P. 191–200.

References

1. ITTC : Recommended Procedures and Guidelines : 7.5–02–03–1.4. 1978 ITTC Performance Prediction Method : Rev. 04 / Ed. Propulsion Committee of the 28th ITTC. [S. l.], 2017. 15 p.
2. Handbook of ship theory: in 3 volumes. Vol. 1: Hydromechanics. Ship resistance. Ship propulsors / [Ya. Voitkunsky et al.]. Leningrad : Sudostroenie, 1985. 764 p. (in Russian).
3. Kanevsky G.I., Klubnichkin A.M., Sazonov K.E. Propulsion performance predictions for multi-shaft vessels. St. Petersburg : Krylov State Research Centre, 2019. 160 p. (in Russian).
4. Lerbs H.W. On the Effects of Scale and Roughness on Free Running Propellers // Journal of the American Society of Naval Engineers. 1951. Vol. 63, No. 1. P. 58–94. DOI: 10.1111/j.1559-3584.1951.tb02878.x.
5. Proceedings of the 22nd ITTC Propulsion Committee Propeller RANS/Panel Method Workshop / Ed. B. Gindroz, T. Hoshino, J. Pylkkanen. Grenoble, 1998.
6. Mishkevich V.G. Development of vortex theory methods for problems of marine ship propulsors to reduce their energy consumption. Doctor of Technical Sciences dissertation : 05.08.01. Leningrad, 1986. 553 p. (in Russian).
7. Kanevsky G.I., Pustoshny A.F. Scale effect on hydrodynamic characteristics of propellers // Transactions of the Krylov State Research Centre. 1973. Vol. 276: Hydrodynamic issues of transport ships. P. 62–78 (in Russian).
8. Schlichting H. Boundary layer theory. Moscow : Nauka, 1974 (in Russian).
9. Development of prediction methods for propulsion performance of transport ships / V.O. Borusevich, G.I. Kanevsky, S.V. Kaprantsev [et al.] // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2017. Vol. 4(382). P. 21–28 (in Russian).
10. Description of Holtrop statistical method for estimating propulsion performance of marine vessels: technical report / Krylov State Research Centre. St. Petersburg, 2001. No. 41106 (in Russian).
11. Rotta I.K. Turbulent boundary layer in incompressible fluid. Leningrad : Sudostroenie, 1967. 231 p. (in Russian).
12. Katsman F.M., Pustoshny A.F., Shtumpf V.M. Propulsion qualities of marine vessels. Leningrad : Sudostroenie, 1972. 510 p. (in Russian).
13. Method of analysis on roughness effect on hydrodynamic characteristics of hull surface / V.V. Drobленков, G.I. Kanevsky, V.M. Shtumpf, V.N. Shcheredin //

- Shipbuilding issues. Series: Ship design. 1977. Vol. 15. P. 510 (*in Russian*).
14. Shell roughness effect on resistance of transport ships / *L.N. Dushina, G.I. Kanevsky, V.M. Shtumpf, V.N. Shcheredin* // Transactions of the Krylov State Research Centre. 1981. Vol. 287: Collection of papers on hydrodynamics of transport ships. P. 53–61 (*in Russian*).
 15. *Kanevsky G.I., Lobachev M.P.* Investigation of propeller blade condition effect on their hydrodynamic characteristics // Shipbuilding issues. Series: Ship design. 1984. Vol. 41. P. 57–62 (*in Russian*).
 16. *Pustoshny A.V., Sverchkov A.V., Shevtsov S.P.* Surface roughness effect of propeller on its propulsive performance // Transactions of the Krylov State Research Centre. Vol. 4(390). P. 11–26. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-4-390-11-26 (*in Russian*).
 17. Scale effect on hydrodynamic characteristics of propellers in icebreakers and ice-class carriers / *G.I. Kanevsky, A.M. Klubnichkin, A.L. Popov, K.E. Sazonov* // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2020. Vol. 2(392). P. 24–35. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-2-392-24-35 (*in Russian*).
 18. *Kanevsky G.I., Kruglova S.N.* The scale effect influence on hydrodynamic characteristics of propellers // Lavrentiev Lectures : Proceedings of International Sympos-

ium on Ship Propulsion (SP 2001). St. Petersburg : St. Petersburg State Marine Technical Univ., 2001. P. 191–200.

Сведения об авторах

Александров Станислав Анатольевич, к.т.н., научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-47-91. E-mail: 2_otd@ksrc.ru. <https://orcid.org/0000-0003-2528-3070>.

Каневский Григорий Ильич, д.т.н., руководитель проектов ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. E-mail: gikanev@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-3445-4575>.

About the authors

Stanislav A. Aleksandrov, Cand. Sci. (Eng.), Researcher, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-47-91. E-mail: 2_otd@ksrc.ru. <https://orcid.org/0000-0003-2528-3070>.

Grigory I. Kanevsky, Dr. Sci. (Eng.), Project Manager, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. E-mail: gikanev@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-3445-4575>.

Поступила / Received: 13.04.22
Принята в печать / Accepted: 28.06.22
© Александров С.А., Каневский Г.И., 2022