

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-1-399-31-42
УДК 629.5.035.5

А.Ю. Яковлев¹, Тхант Зин^{1, 2}

¹ ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет»

² ВМС Мьянмы, Штаб-квартира Военно-морской верфи, Танлын

МЕТОД ПЕРЕСЧЕТА РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ ГРЕБНОГО ВИНТА НА НАТУРНЫЕ УСЛОВИЯ

Объект и цель научной работы. Объект исследования – численный метод, позволяющий моделировать характеристики гребного винта (ГВ) в модельных и натуральных условиях. Целью является создание такого метода для пересчета результатов испытаний модели ГВ на натуре.

Материалы и методы. Для моделирования характеристик гребного винта усовершенствован численный метод Э.Э. Папмеля. При моделировании обтекания профилей цилиндрических сечений лопастей ГВ и ступицы применяются методы граничных интегральных уравнений и интегральные методы расчета пограничного слоя с учетом ламинарно-турбулентного перехода.

Основные результаты. Разработан метод учета масштабного эффекта для гребных винтов. Метод применен для пересчета результатов модельных испытаний на натуре.

Заключение. Метод имеет практическое значение для проектирования гребных винтов современных типов.

Ключевые слова: гребной винт, крыльевой профиль, тело вращения, масштабный эффект, расчетный метод, сопоставление с экспериментом.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-1-399-31-42
UDC 629.5.035.5

A. Yakovlev¹, Thant Zin^{1, 2}

¹ Saint Petersburg State Marine Technical University

² Myanmar Navy, Naval Dockyards HQ, Thanlyin, Myanmar

FULL-SCALE EXTRAPOLATION METHOD FOR PROPELLER MODEL TEST DATA

Object and purpose of research. This paper discusses numerical method for simulation of propeller parameters in model and full-scale conditions. The purpose is to develop a similar methods for extrapolation of propeller model test data to the full-scale.

Materials and methods. Propeller parameters are simulated as per the improved numerical method of E. Pappel. The flow around cylindrical section profiles of blades and hub is simulated as per the methods of boundary integral equations and integral calculation methods for the boundary layer with consideration of laminary-to-turbulent transition.

Main results. Development of the method taking into account scale effect for propellers. The method has been applied to extrapolate model test data to the full scale.

Conclusion. The method is of practical value for modern propeller design.

Keywords: propeller, foil profile, body of revolution, scale effect, calculation method, comparison with experiment.

The authors declare no conflicts of interest.

Для цитирования: Яковлев А.Ю., Тхант Зин. Метод пересчета результатов модельных испытаний гребного винта на натурные условия. Труды Крыловского государственного научного центра. 2022; 1(399): 31–42.

For citations: Yakovlev A., Thant Zin. Full-scale extrapolation method for propeller model test data. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2022; 1(399): 31–42 (in Russian).

Введение

Introduction

Задача пересчета результатов модельных испытаний гребных винтов на натурные условия вызвана наличием масштабного эффекта. Классический подход к учету данного эффекта [1] был разработан применительно к ГВ, которые имеют форму, характерную для первой половины и середины XX в. Эта форма отличалась малыми величинами саблевидности и откидки, распределением шага и кривизны лопасти, обеспечивающими оптимальное по Бетцу распределение нагрузки, скругленной и мало искривленной формой конца лопасти. Ступица гребного винта имела хорошо обтекаемую форму и относительно малый радиус, ее протяженность была невелика.

За прошедшее с тех пор время требования к гребным винтам существенно изменились, что отразилось на их характерной геометрии. Стремление оптимальным образом вписать лопасти в набегающий поток привело к созданию ГВ с переменным распределением параметров лопасти по радиусу, отличающихся от оптимальных форм в классическом понимании. Требования снижения вибраций привели к развитию саблевидных гребных винтов, а также ГВ с заведомо неоптимальным по КПД распределением нагрузки по лопасти.

Современные методы проектирования позволили задействовать при оптимизации формы лопастей все параметры их геометрии, что привело к заметным локальным изменениям их формы. Наконец были предложены принципиально новые формы лопастей ГВ, обтекание которых заметно отличается от традиционного представления. Таким образом, задача учета масштабного эффекта для гребных винтов с целью пересчета результатов их модельных испытаний на натуре в последнее время стала особенно актуальной.

Развитие методов учета масштабного эффекта для гребных винтов

Evolution of scale effect consideration methods for propellers

Историю развития методов учета масштабного эффекта для гребных винтов рассмотрим на примере российских исследований. До конца XX в. в отечественном судостроении учет масштабного эффекта для ГВ практически не осуществлялся. Указания на

необходимость такого учета отсутствуют в ключевой монографии середины XX в., посвященной судовым движителям [2]. В известном учебнике [3], изданном в 1980-х гг., уже отмечается наличие масштабного эффекта для движителей, но говорится о возможности им пренебречь, если испытания модели проводятся при числах Рейнольдса, превосходящих величину $4-5 \cdot 10^5$.

Наряду с консервативным подходом, представленным в учебнике [3], в советских научных монографиях и публикациях 1980-х гг. прямо говорится о необходимости учета масштабного эффекта [4]. В это время были разработаны уникальные российские методики учета этого эффекта, отвечающие мировому уровню тех лет [4–6].

Теоретической основой отечественных методов учета масштабного эффекта послужили расчетные исследования обтекания профилей, характерных для цилиндрических сечений гребных винтов, которые выполнил коллектив авторов под руководством В.В. Дробленкова и Г.И. Каневского [7, 8]. Эти исследования проводились путем непосредственного решения уравнений пограничного слоя. Важным отличием российских исследований от зарубежных являлся учет шероховатости профилей и лопастей гребных винтов при учете масштабного эффекта [4, 9]. Непосредственным результатом систематизации и анализа результатов выполненных расчетов стала методика введения поправок на вязкость [10]. Она позволила учитывать масштабный эффект для ГВ и стала неотъемлемой составляющей всех российских разработок методов их расчета.

За время, прошедшее с момента создания указанной отечественной методики, за рубежом был разработан ряд новых методов учета масштабного эффекта. Среди современных методов данного учета можно указать на метод [11], который представляет собой один из вариантов метода плоских сечений типа Лербса, а также ряд более ранних разработок [12, 13].

Внедрение в практику судостроения гребных винтов с отогнутыми концами лопастей (Kappel propellers) выявило недостатки стандартной зарубежной методики учета масштабного эффекта [1]. Это потребовало проведения сопоставительных исследований [14] и в итоге привело к разработке новых методов масштабирования на основе метода плоских сечений [15, 16].

В связи с активным развитием винторулевых колонок (ВРК) разрабатываются специальные методы учета масштабного эффекта для этих движи-

телей. Метод [17] позволяет определять характеристики натурной ВРК на основе результатов модельных испытаний гребного винта в свободной воде и корпуса колонки. В работе [18] представлен метод учета масштабного эффекта для специфической разработки движителя Azipod фирмы ABB. К сожалению, апробация методов учета масштабного эффекта для ВРК существенно затруднена из-за отсутствия опубликованных результатов их натурных испытаний [14].

В последнее время, в связи с успехами в развитии пакетов вычислительной гидромеханики, одним из перспективных направлений учета масштабного эффекта стал непосредственный расчет натуральных характеристик [19–21]. Этот подход не предусматривает проведения модельных испытаний и, следовательно, не в полной мере может быть отнесен к методам пересчета на натуру. Тем не менее он может стать основным, в случае если удастся достигнуть приемлемой точности прогноза натуральных характеристик. В то же время многочисленные исследования [14] показали, что имеющиеся методы вычислительной гидромеханики еще далеки от совершенства и их прогнозы имеют заметные расхождения с экспериментом. Таким образом, можно сделать вывод о необходимости разработки современного метода пересчета результатов модельных испытаний ГВ на натуру.

С учетом изложенного, для решения практических задач было предложено разработать метод учета масштабного эффекта для гребных винтов, основанный на анализе течения по цилиндрическим сечениям. Одним из важных требований к данному методу является учет особенностей геометрии современных ГВ.

Постановка задачи

Formulation of task

Проблема масштабного эффекта возникает тогда, когда при проведении модельных испытаний не удастся соблюсти механическое подобие. Это подобие выполняется, если одновременно выполняются требования геометрического, кинематического и динамического подобий.

Под геометрическим подобием подразумевается совпадение безразмерной геометрии натурального гребного винта и его модели.

Кинематическое подобие означает совпадение картин течения в модельных и натуральных условиях. Для гребных винтов оно обеспечивается при со-

блюдении равенства значений поступи J натурального гребного винта и его модели:

$$J = \frac{V}{nD}, \quad (1)$$

где V – скорость перемещения гребного винта, n – число оборотов ГВ, D – диаметр ГВ.

Для соблюдения динамического подобия необходимо обеспечить равенство в модельных и натуральных условиях всех безразмерных чисел подобия, характеризующих отношение сил различной природы. При этом наибольшие сложности вызывает моделирование по числу Рейнольдса:

$$Re = \frac{\pi n D C}{\nu}, \quad (2)$$

где ν – кинематический коэффициент вязкости, C – ширина лопасти на характерном радиусе.

Это обусловлено тем, что для совпадения модельных и натуральных чисел Рейнольдса необходимо обеспечить увеличение числа оборотов модели пропорционально квадрату масштаба, что практически невозможно реализовать, тем более что силы на модели гребного винта должны при этом совпадать с силами на натурном ГВ. Таким образом, для гребных винтов практически неизбежно имеет место масштабный эффект по числу Рейнольдса.

Сложности учета масштабного эффекта по числу Рейнольдса связаны с существенным изменением характера течения при переходе от модельных к натурным условиям. На лопастях модели ГВ имеет место протяженная область ламинарного течения, которая может менять протяженность при относительно небольшом изменении числа Рейнольдса. На натурном ГВ пограничный слой обычно быстро турбуляризуется, и особенности ламинарного течения и ламинарно-турбулентного перехода проявляются в малой степени. Таким образом, для учета масштабного эффекта необходимо разработать метод, учитывающий ламинарно-турбулентный переход.

При реализации метода учета масштабного эффекта предполагается, что имеются результаты модельных испытаний при нескольких значениях Re , лежащих в диапазоне 10^4 – 10^6 . На основании этих данных необходимо оценить характеристики профиля при больших числах Рейнольдса, имеющих порядок $2 \cdot 10^6$ – 10^7 и выше.

В основу предлагаемого метода учета масштабного эффекта положены следующие положения.

1. Корпуса судов, объекты морской техники, их выступающие части и движители имеют сложную

форму, которая обычно может быть представлена в виде комбинации простых базовых элементов. К числу таких элементов относятся гидродинамический профиль и тело вращения. Разработав метод учета масштабного эффекта для этих тел, можно развивать методы учета масштабного эффекта для более сложных объектов.

- Наличие в математических моделях ограниченного числа свободных эмпирических параметров должно позволить настраивать математическую модель, исходя из согласования с имеющимися экспериментальными данными при модельных числах Рейнольдса и потом проводить расчет для натуральных чисел Рейнольдса.

Ниже представлена разработка метода, отвечающего перечисленным выше требованиям.

Учет масштабного эффекта для гидродинамических профилей

Scale effect consideration for hydrodynamic profiles

В работах [22, 23] был представлен полуэмпирический метод расчета гидродинамических характеристик профиля, позволяющий получать достоверные результаты в широком диапазоне чисел Рейнольдса.

В этом методе для расчета обтекания профиля используется метод граничных уравнений, дающий решение в невязкой жидкости. Для учета процессов, обусловленных вязкостью жидкости, исполь-

зуются соотношения, полученные на основе теории пограничного слоя. Коэффициент сопротивления профиля C_D вычисляется на основании формулы Сквайра – Юнга, в которую подставляется определенная в процессе расчета пограничного слоя толщина потери импульса. Расчет пограничного слоя выполняется с помощью известных интегральных соотношений, с учетом ламинарно-турбулентного перехода (в плоской постановке) и развития отрывного обтекания. Коэффициент подъемной силы профиля C_L получают с учетом введения специальной поправки, зависящей от угла атаки профиля α и числа Рейнольдса, которая определяется на основе расчета пограничного слоя.

В реализованной расчетной схеме присутствуют свободные параметры, которые определяются по результатам сопоставления с данными модельных испытаний: f_0^* , ε^* , L_s и σ [24]. Величины f_0^* , ε^* оказывают влияние на момент наступления ламинарно-турбулентного перехода и вычисляются из условия согласования расчетной зависимости коэффициента сопротивления профиля от числа Рейнольдса с экспериментальными данными при нулевом угле атаки. Параметры L_s и σ позволяют согласовать расчет с модельным экспериментом в области отрывного обтекания. Причем параметр L_s оказывает заметное влияние на величину критического угла атаки, а его выбор обеспечивает хорошее согласование расчета и эксперимента. Таким образом, за счет подбора параметров f_0^* , ε^* , L_s и σ производится настройка расчетного метода. После выпол-

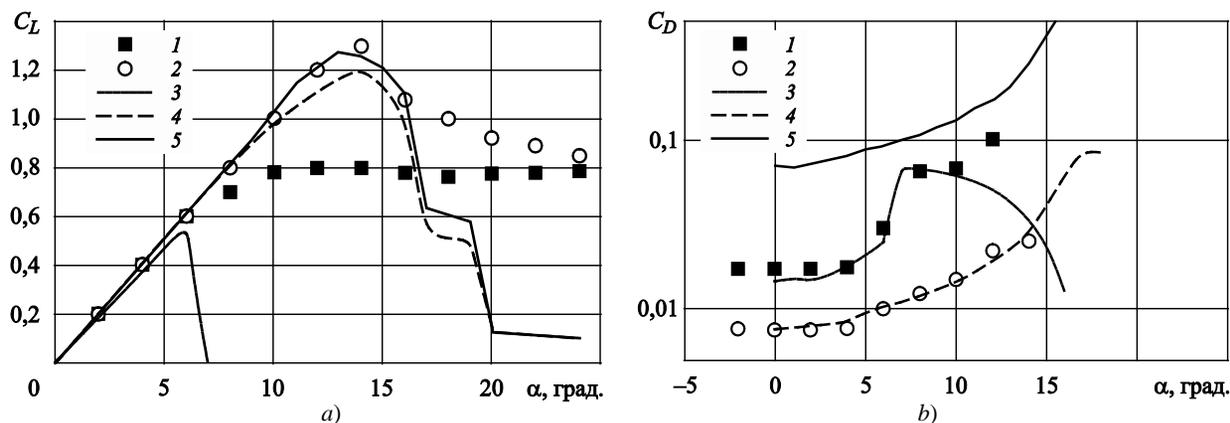


Рис. 1. Учет масштабного эффекта для профиля NACA0009 для зависимости коэффициента подъемной силы профиля от угла атаки (a) и для зависимости коэффициента сопротивления профиля от угла атаки (b): 1 – эксперимент при $Re = 84,4 \cdot 10^3$ (модельный); 2 – эксперимент при $Re = 3,14 \cdot 10^6$ (натурный); 3 – расчет при $Re = 84,4 \cdot 10^3$; 4 – расчет при $Re = 3,14 \cdot 10^6$; 5 – пересчет

Fig. 1. NACA0009 scale effect consideration for lift coefficient-versus-attack angle curve (a) and resistance coefficient-versus attack angle curve (b): 1 – experiment at $Re = 84.4 \cdot 10^3$ (model); 2 – experiment at $Re = 3.14 \cdot 10^6$ (full scale); 3 – calculation at $Re = 84.4 \cdot 10^3$; 4 – calculation at $Re = 3.14 \cdot 10^6$; 5 – extrapolation

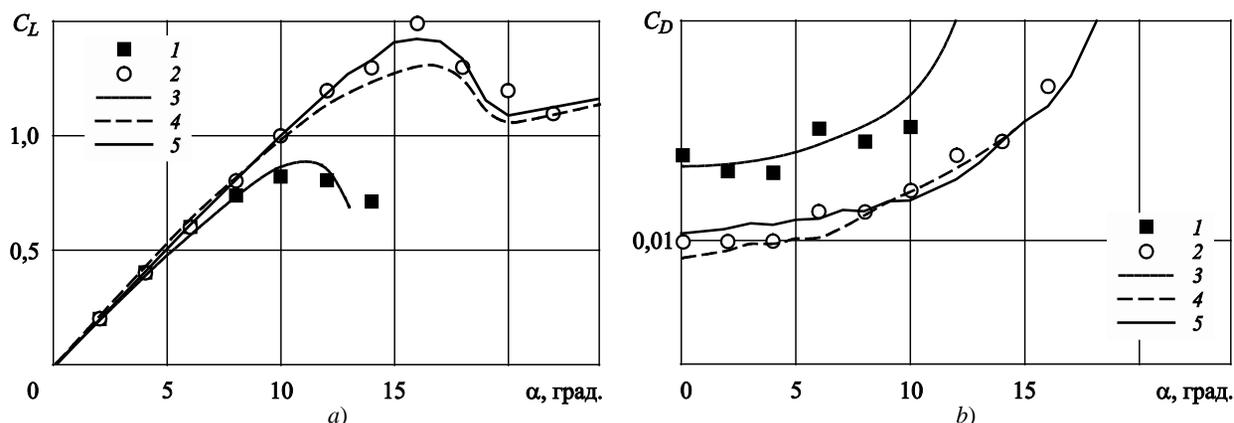


Рис. 2. Учет масштабного эффекта для профиля NACA0015 для зависимости коэффициента подъемной силы профиля от угла атаки (а) и для зависимости коэффициента сопротивления профиля от угла атаки (b): 1 – эксперимент при $Re = 84,4 \cdot 10^3$ (модельный); 2 – эксперимент при $Re = 3,26 \cdot 10^6$ (натурный); 3 – расчет при $Re = 84,4 \cdot 10^3$; 4 – расчет при $Re = 3,26 \cdot 10^6$; 5 – пересчет

Fig. 2. NACA0015 scale effect consideration for lift coefficient-versus-attack angle curve (a) and resistance coefficient-versus-attack angle curve (b): 1 – experiment at $Re = 84.4 \cdot 10^3$ (model); 2 – experiment at $Re = 3.26 \cdot 10^6$ (full scale); 3 – calculation at $Re = 84.4 \cdot 10^3$; 4 – calculation at $Re = 3.26 \cdot 10^6$; 5 – extrapolation

нения настройки можно проводить расчет для натуральных чисел Рейнольдса.

Разработанный метод учета масштабного эффекта был применен для пересчета результатов испытаний ряда профилей [25]. Сопоставление результатов пересчета с экспериментальными данными для профиля NACA0009 при принятом в качестве натурального $Re = 3,14 \cdot 10^6$ представлено на рис. 1. В качестве модельных результатов при выполнении пересчета использованы эксперимен-

тальные зависимости C_D и C_L от угла атаки при числах Рейнольдса порядка $10^4 - 10^5$ [25].

На рис. 2 и 3 представлены аналогичные результаты для профилей NACA0015 и NACA4412. На рис. 1, 2 и 3 помимо характеристик при натуральных величинах числа Рейнольдса $Re = 3,14 \cdot 10^6$ приведены экспериментальные и расчетные оценки при малых модельных числах Рейнольдса, что позволяет визуально оценить изменения характеристик профиля при учете масштабного эффекта.

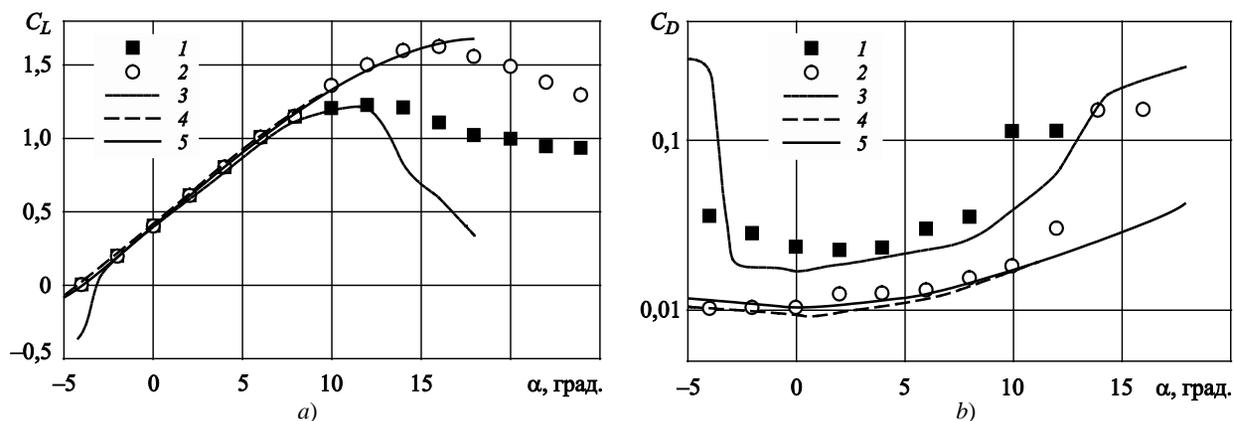


Рис. 3. Учет масштабного эффекта для профиля NACA4412 для зависимости коэффициента подъемной силы профиля от угла атаки (а) и для зависимости коэффициента сопротивления профиля от угла атаки (b): 1 – эксперимент при $Re = 83 \cdot 10^3$ (модельный); 2 – эксперимент при $Re = 3,0 \cdot 10^6$ (натурный); 3 – расчет при $Re = 83 \cdot 10^3$; 4 – расчет при $Re = 3,0 \cdot 10^6$; 5 – пересчет

Fig. 3. NACA4412 scale effect consideration for lift coefficient-versus-attack angle curve (a) and resistance coefficient-versus-attack angle curve (b): 1 – experiment at $Re = 83 \cdot 10^3$ (model); 2 – experiment at $Re = 3.0 \cdot 10^6$ (full scale); 3 – calculation at $Re = 83 \cdot 10^3$; 4 – calculation at $Re = 3.0 \cdot 10^6$; 5 – extrapolation

Учет масштабного эффекта для тела вращения

Scale effect consideration for body of revolution

Используемый метод учета масштабного эффекта для тела вращения представлен в [26]. Распределение давления на теле вращения определяется с помощью метода граничных интегральных уравнений [27]. Для моделирования пограничного слоя на теле вращения используется переход к решению задачи для плоского пограничного слоя. Данный прием позволяет применить все разработки, сделанные ранее при создании метода учета масштабного эффекта для плоских крыльевых профилей, к осесимметричным телам. Для расчета сопротивления тела вращения используется аналог формулы Сквайра – Юнга для осесимметричных тел [26].

В качестве параметров масштабирования, как и ранее для профилей, выступают параметры, входящие в представленный выше расчетный метод и определяемые по результатам сопоставления с данными модельных испытаний. К числу таких параметров для тел вращения могут быть отнесены: f_0^* , ε^* , σ и α . Величины f_0^* , ε^* аналогичны случаю обтекания профиля, рассмотренному выше. Параметр α учитывает влияние скорости в хвостовой оконечности на сопротивление тела. Чем значи-

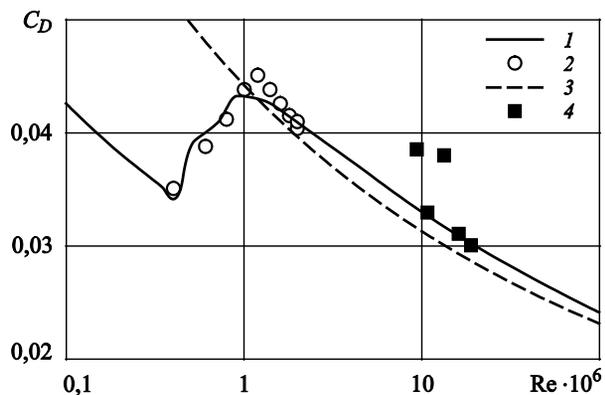


Рис. 4. Результаты пересчета результатов модельных испытаний тела DTMB4154 на широкий диапазон чисел Рейнольдса: 1 – пересчет по представленному методу; 2 – модельные данные [28]; 3 – расчет по формуле Шольца; 4 – натурные измерения для дирижабля ZS2G-1 [29]

Fig. 4. Extrapolation results of model test data for body DTMB4154 to a wide range of Reynolds numbers: 1 – extrapolation as per the suggested method; 2 – model data [28]; 3 – calculation as per Scholz expression; 4 – full-scale measurements for ZS2G-1 airship [29]

тельное скорость отличается от скорости набегающего потока, тем сильнее влияние. Роль параметра σ заключается в учете небольших по протяженности областей отрывного течения в хвостовой части тел вращения. Процесс учета масштабного эффекта в целом аналогичен случаю профиля: за счет подбора параметров производится настройка расчетного метода, после выполнения настройки можно проводить расчет для натуральных чисел Рейнольдса.

В качестве примера учета масштабного эффекта рассмотрено тело вращения DTMB4154 58 серии [28]. Результаты пересчета результатов испытаний этой модели на широкий диапазон чисел Рейнольдса представлены на рис. 4. В качестве натуральных данных рассматриваются измерения сопротивления корпуса дирижабля ZS2G-1 [29], который имеет форму, близкую к телу DTMB4154. На том же рисунке приведены расчеты по формуле Шольца [4], используемой в инженерной практике для подобных оценок. Как видно, использование этой формулы дает занижение реального сопротивления порядка 5–7 %.

Метод учета масштабного эффекта для гребного винта

Scale effect consideration method for propeller

Используемый метод моделирования работы гребного винта [30] представляет собой модифицированный метод Э.Э. Папмеля. В рамках данного метода определение гидродинамических сил, создающих упор и крутящий момент винта, производится по элементам сечений лопасти на различных радиусах r , которые представляют собой гидродинамические профили.

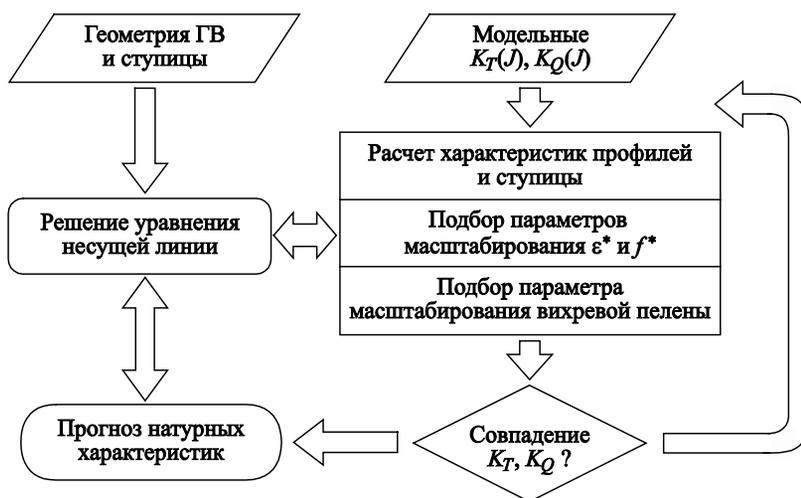
Углы атаки этих профилей и скорости их обтекания W определяются с учетом осевой w_x и тангенциальной скоростей w_θ , вызванных работой гребного винта. Вызванные скорости на различных режимах работы ГВ являются сложной функцией угла индуктивной поступи β_i , включая зависимость от коэффициентов подъемной силы C_L и сопротивления C_D [30], а также поправки Голдстейна [31] на конечность числа лопастей K_Z .

$$K_Z = \frac{a}{\arccos \left[\exp \left[-b \cdot Z \left(1 - \frac{2r}{D} \right) \frac{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \beta_i}}{\operatorname{tg} \beta_i} \right] \right]}, \quad (3)$$

где Z – число лопастей гребного винта, a и b – коэффициенты (в классическом варианте $a = 2/\pi$, $b = 1/2$).

Рис. 5. Алгоритм метода учета масштабного эффекта для гребного винта

Fig. 5. Algorithm of scale effect consideration method for propeller



Для однозначного определения вызванных скоростей необходимо решить нелинейное алгебраическое уравнение относительно неизвестной величины угла индуктивной поступи β_i , следующего из треугольника скоростей:

$$\beta_i = \arctg \frac{V + w_x}{2\pi nr - w_\theta}. \quad (4)$$

Далее могут быть получены выражения для осевой dF_x и касательной dF_θ составляющих гидродинамических сил элемента лопасти, связывающие их с характеристиками профиля C_L и C_D :

$$\begin{aligned} dF_x &= \rho \frac{W^2}{2} C \cdot [C_L \cdot \cos \beta_i - C_D \cdot \sin \beta_i]; \\ dF_\theta &= -\rho \frac{W^2}{2} C \cdot [C_L \cdot \sin \beta_i + C_D \cdot \cos \beta_i]. \end{aligned} \quad (5)$$

Для получения силы и момента, действующих на гребном винте, нужно выполнить описанную процедуру для ряда элементов лопасти, проинтегрировать силы по радиусу и просуммировать по числу лопастей. В результате можно получить зависимость безразмерных коэффициентов упора K_T и момента K_Q ГВ от поступи:

$$\begin{aligned} K_T &= \frac{Z}{\rho n^2 D^4} \int_{r_0}^{D/2} dF_x; \\ K_Q &= \frac{Z}{\rho n^2 D^5} \int_{r_0}^{D/2} dF_\theta. \end{aligned} \quad (6)$$

где r_0 – радиус ступицы.

Под параметрами масштабирования гребного винта, как и ранее для профилей [24] и осесиммет-

ричных тел [26], понимаются параметры, входящие в расчетный метод и определяемые по результатам сопоставления с данными модельных испытаний. Они должны определяться из условия согласования расчетной зависимости с экспериментальными данными. К числу таких параметров могут быть отнесены: f_0^* , ε^* , L_s и σ , введенные выше для профилей [24].

Однако при моделировании работы лопастей гребного винта существенным является учет трехмерных эффектов, связанных с влиянием сложной формы вихревых пелен за лопастями. Для учета этих особенностей коэффициенты a и b в поправках Голдстейна (3) предлагается также рассматривать в качестве параметров масштабирования. Первый из них позволяет учесть отличие реальных вызванных скоростей от их теоретической оценки, а второй обеспечивает учет влияния особенностей экспериментального распределения вызванных скоростей по радиусу от теоретического.

Алгоритм метода учета масштабного эффекта для ГВ представлен на рис. 5. В этом алгоритме в качестве отдельных процедур используются методы учета масштабного эффекта для гидродинамических профилей и тел вращения.

В качестве основных этапов этот алгоритм включает:

1. Задание геометрии гребного винта и модельных кривых действия. Геометрия ГВ включает в себя геометрию лопастей, задаваемую в соответствии с общепринятыми требованиями [4]. Геометрия ступицы ГВ задается в виде зависимости радиуса ступицы от продольной координаты. В качестве точки отсчета этой координаты принята плоскость диска ГВ.

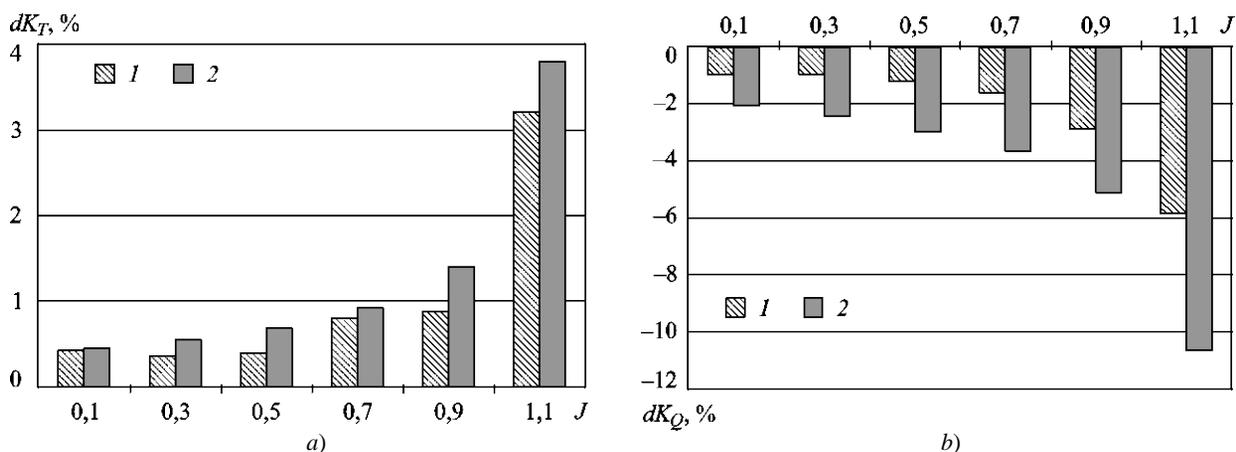


Рис. 6. Сопоставление поправок учета масштабного эффекта для гребного винта P1374 на коэффициент упора (а) и на коэффициент момента (б): 1 – по представленному методу, 2 – по методике ИТТС [1]

Fig. 6. Comparison of scale effect corrections for propeller P1374 in terms of thrust coefficient (a) and torque coefficient (b): 1 – as per the suggested method, 2 – as per ITTC Procedure [1]

Модельные кривые действия, определенные в результате испытаний в кавитационной трубе или опытовом бассейне, задаются в виде таблицы величин K_T и K_Q при фиксированных величинах поступи гребного винта J .

2. Рассчитываются гидродинамические характеристики профилей цилиндрических сечений и ступицы. По заданной геометрии профилей цилиндрических сечений проводится расчет в соответствии с методом [23]. В результате определяются коэффициенты подъемной силы C_L и сопротивления C_D каждого из профилей цилиндрических сечений. Обычно для получения достоверных оценок необходимо рассмотреть порядка 8–12 профилей, соответствующих различным радиусам лопасти. Ступица ГВ моделируется как осесимметричное тело, и для нее проводится расчет в соответствии с методом [26].
3. Определяются параметры масштабирования ε^* и f^* . Подбор величин ε^* и f^* осуществляется, исходя из согласования с интегральными характеристиками лопастной системы $K_T(J)$ и $K_Q(J)$. Параметры масштабирования для ступицы гребного винта выбираются на основе согласования с результатами испытания фальшступицы модели ГВ.
4. Определяется параметр масштабирования вихревой пелены, включающий коэффициенты a и b в поправках Голдстейна (3). Таким образом, для лопастной системы (без учета ступицы) из условия согласования расчетных и эксперимен-

тальных зависимостей $K_T(J)$ и $K_Q(J)$ при модельных числах Рейнольдса определяются параметры ε^* , f^* , a и b . Для этих четырех параметров имеем четыре экспериментальные характеристики: значения коэффициентов упора и момента при поступи, соответствующей проектному режиму, и значения их производных по поступи, что в итоге делает задачу определения параметров масштабирования замкнутой.

5. Выполняется решение уравнения (4).
6. Если расчетные величины K_T , K_Q не совпали с модельными, то повторяем процесс с шага 2.
7. Если эти величины совпали, то переходим к прогнозированию натуральных характеристик. Они определяются путем расчета гребного винта по тому же методу, что и для модельных условий, с выбранными значениями параметров масштабирования, но при натуральных числах Рейнольдса.
8. Разность модельных и натуральных величин K_T и K_Q при одинаковых значениях поступи дает величины поправок, учитывающих масштабный эффект.

На рис. 6 в качестве примера работы метода представлены поправки, полученные для гребного винта P1374, геометрия которого приведена в [32]. Они сопоставлены с поправками, определенными по традиционной методике ИТТС [1]. Как видно, характер зависимости поправок от поступи для обоих методов близок. В то же время величины поправок, вычисленные по представленному методу, оказались меньше, чем по методике ИТТС.

Заключение

Conclusion

По результатам выполненной работы можно сделать следующие выводы:

- Разработаны методы учета масштабного эффекта для плоских крыльевых профилей и тел вращения. Эффективность этих методов подтверждена путем сопоставления результатов расчетов с известными экспериментальными данными для большого числа профилей и тел вращения.
- На основе методов расчета профилей и тел вращения произведена модификация метода Э.Э. Папмеля, применяемого для расчета гребных винтов. Модифицированный метод непосредственно используется для учета масштабного эффекта. С этой целью на основе теоретических соотношений определено ограниченное число параметров масштабирования, позволяющих согласовать результаты расчетов характеристик модели ГВ с результатами модельных испытаний.
- Расчеты, выполненные с помощью разработанного метода, показали возможность получения достоверных величин поправок, используемых для пересчета результатов испытаний модели ГВ на натуру. По сравнению с поправками МКОБ [1], представленный метод дает менее оптимистичные оценки характеристик натурного гребного винта.

Список использованной литературы

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. 1.]. 2017. 15 p.
2. Басин А.М., Мишиович И.Я. Теория и расчет гребных винтов. Ленинград : Судпромгиз, 1963.
3. Артюшков Л.С., Ачкинадзе А.Ш., Русецкий А.А. Судовые движители. Ленинград : Судостроение, 1988. 294, [1] с.
4. Справочник по теории корабля: в 3 т. Т. 1: Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители / [Я.И. Войткунский и др.]. Ленинград : Судостроение, 1985. 764 с.
5. Гребные винты: современные методы расчета / В.Ф. Бавин, Н.Ю. Завадовский, Ю.Л. Левковский, В.Г. Мишкевич. Ленинград : Судостроение, 1983. 296 с.
6. Турбал В.К., Шпаков В.С., Штумпф В.М. Проектирование обводов и движителей морских транспортных судов. Ленинград : Судостроение, 1983. 302 с.
7. Дробленков В.В., Каневский Г.И. Подъемная сила и вязкостное сопротивление плоских профилей в вязкой несжимаемой жидкости // Вопросы судостроения. Сер.: Проектирование судов. 1980. Вып. 23. С. 26–32.
8. Подъемная сила и вязкостное сопротивление винтовых профилей в вязкой жидкости и масштабный эффект гидродинамических характеристик гребных винтов / В.В. Дробленков, Г.И. Каневский, М.М. Карулина [и др.] // Вопросы судостроения. Сер.: Проектирование судов. 1982. Вып. 32. С. 93–102.
9. Кацман Ф.М., Пустошный А.Ф. Метод расчета влияния шероховатости гребных винтов на винтовые характеристики движителя // Научно-технический сборник Регистра СССР. 1981. Вып. 11. С. 39–51.
10. Мишкевич В.Г. Учет влияния вязкости при проектировочном и поверочном расчетах гребного винта по вихревой теории // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 1981. Вып. 287: Сборник статей по гидродинамике транспортных судов. С. 62–73.
11. Helma S. An Extrapolation Method Suitable for Scaling of Propellers of any Design // Proceedings of the Fourth International Symposium on Marine Propulsors (SMP'15). Austin : Univ. of Texas at Austin, [2015]. P. 452–465.
12. Meyne K. Experimentelle und theoretische betrachtungen zum maßstabseffekt bei modellpropeller-untersuchungen // Schiffstechnik. 1968. Vol. 77. No. 15. P. 45–39.
13. Development of a Strip Method Proposed as New Standard for Propeller Performance Scaling / H. Streckwall, L. Greitsch, J. Müller [et al.] // Ship Technology Research. 2013. Vol. 60. No. 2. P. 58–69. DOI: 10.1179/str.2013.60.2.002.
14. Propulsion Committee: Final Report and Recommendations to the 28th ITTC // Proceedings of 28th International Towing Tank Conference: in 2 vol. Zürich: ITTC, 2017. Vol. 1. P. 69–130.
15. Scale effects in open water test results for performance prediction of conventional and unconventional propellers / R. Quereda, C. Soriano, M. Perez-Sobrino [et al.] // Ingeniería naval académica. 2016. April (No. 5). P. 215 (35 p.). URL: <https://sectormarítimo.es/wp-content/uploads/2016/04/5-01-INA.pdf> (accessed: 24.11.2021).
16. Comparison of Different Scaling Methods for Model Tests with CLT Propellers / J. González-Adalid [et al.] // Proceedings of the 11th International Conference on Hydrodynamics (ICHHD 2014). Singapore, 2014. 8 p. URL: <http://www.sinm.it/sites/default/files/ICHHD2014-CLT.pdf> (accessed: 24.11.2021).
17. Park H.-G., Choi J.-K., Kim H.-T. An Estimation Method of Full Scale Performance for Pulling Type Podded

- Propellers // *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2014. Vol. 6. No. 4. P. 965–980. DOI: 10.2478/IJNAOE-2013-0225.
18. *Veikonheimo T., Miettinen P., Huisman J.* On the advanced extrapolation method for a new type of podded propulsor via CFD simulations and model measurements // *Proceedings of the Fifth International Symposium on Marine Propulsors (SMP'17)*. Espoo : VTT Technical Research Center, 2017. P. 409–416.
 19. *Lin T.-Y., Kouh J.-S.* On the Scale Effect of Thrust Deduction in a Judicious Self-Propulsion Procedure for a Moderate-Speed Containership // *Journal of Marine Science and Technology*. 2015. Vol. 20. No. 2. P. 373–391. DOI: 10.1007/s00773-014-0289-7.
 20. *Ponkratov D., Zegos C.* Validation of ship scale CFD self-propulsion simulation by the direct comparison with sea trial results // *Proceedings of the Fourth International Symposium on Marine Propulsors (SMP'15)*. Austin : Univ. of Texas at Austin, [2015]. P. 289–299.
 21. Open Water results comparison for three propellers with transition model, applying crossflow effect, and its comparison with experimental results / *A. Moran-Guerrero, J. Gonzalez-Adalid, M. Perez-Sobrino, L. Gonzalez-Gutierrez* // *Proceedings of the Fifth International Symposium on Marine Propulsors (SMP'17)*. Espoo : VTT Technical Research Center, 2017. P. 690–697.
 22. *Яковлев А.Ю., Тхант З.* Расчетно-эмпирический метод оценки сопротивления гидродинамических профилей в широком диапазоне чисел Рейнольдса // *Морские интеллектуальные технологии*. 2019. № 2(44), т. 1. С. 21–25.
 23. *Яковлев А.Ю., Тхант З.* Полуэмпирический метод оценки характеристик гидродинамических профилей // *Морские интеллектуальные технологии*. 2019. № 4, т. 1. С. 29–33.
 24. *Яковлев А.Ю., Тхант З.* Метод учета масштабного эффекта для гидродинамических профилей // *Морские интеллектуальные технологии*. 2020. № 1(47), т. 3. С. 25–29. DOI: 10.37220/MIT.2020.47.1.043.
 25. *Jacobs E.N., Sherman A.* Airfoil section characteristics as affected by variations of the Reynolds number: Report No. 586 // *Twenty-third annual report of the National Advisory Committee for Aeronautics: 1937: including technical reports Nos. 577 to 611*. Washington : US Government Printing Office, 1938. P. 227–267.
 26. *Яковлев А.Ю., Тхант З.* Метод учета масштабного эффекта для осесимметричных тел при продольном обтекании // *Морские интеллектуальные технологии*. 2020. № 2, т. 2. С. 28–34. DOI: 10.37220/MIT.2020.48.2.041.
 27. *Бушковский В.А., Яковлев А.Ю.* Метод граничных элементов для расчета обтекания тел, имеющих осевую симметрию // *Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова*. 2008. Вып. 36(320). С. 187–200.
 28. *Gertler M.* Resistance Experiments on a Systematic Series of Streamlined Bodies of Revolution: For Application to the Design of HighSpeed Submarines / Navy Department. Alexandria: DTIC, 1950. 139, [2] p. (David Taylor Model Basin Rept.; No. C-297).
 29. *Cebeci T., Mosinskis G.J., Smith A.M.O.* Calculation of viscous drag and turbulent boundary-layer separation on two-dimensional and axisymmetric bodies in incompressible flows. Long Beach, 1970. 90 p. (McDonnell Douglas Rept.; No. MDC J0973-01).
 30. *Яковлев А.Ю.* Метод расчета тянущей винторулевой колонки и его использование для решения практических задач // *Морские интеллектуальные технологии*. 2018. № 4(42), т. 1. С. 88–94.
 31. *Carlton J.S.* Marine propellers and propulsion. 3rd ed. Amsterdam [et al.] : Elsevier, 2012. XXI. 516 p.
 32. *Savio L., Sileo L., Ås S.K.* A Comparison of Physical and Numerical Modeling of Homogenous Isotropic Propeller Blades // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2020. Vol. 8, No. 1. P. 21 (22 p.). DOI: 10.3390/jmse8010021.

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. *A. Basin, I. Miniovich.* Theory and calculation of propellers. Leningrad, Sudpromgiz, 1963 (*in Russian*).
3. *L. Artyushkov, A. Achkinadze, A. Rusetsky.* Ship propulsors. Text book. Leningrad, Sudostroyeniye, 1988 (*in Russian*).
4. *Ya Voitkunsky et al.* Ship theory. Reference book. In 3 vol. Vol. 1. Hydromechanics. Ship resistance. Marine propulsors. Leningrad, Sudostroyeniye, 1985, 764 pp. (*in Russian*).
5. *V. Bavin, N. Zavadovsky, Yu. Levkovsky, V. Mishkevich.* Propellers: modern calculation methods. Leningrad, Sudostroyeniye, 1983 (*in Russian*).
6. *V. Turbal, V. Shpakov, V. Shtumpf.* Design of hull lines and propellers for sea-going cargo carriers. Leningrad, Sudostroyeniye, 1983, 302 pp. (*in Russian*).
7. *V. Droblenkov, G. Kanevsky.* Lifting force and viscous resistance of flat profiles in viscous incompressible fluid // *Voprosy sudostroyeniya (Shipbuilding matters)*, 1982, Issue 32, pp. 26–32 (*in Russian*).
8. *V. Droblenkov, G. Kanevsky, M. Karulina et al.* Lifting force and viscous resistance of propeller profiles in viscous fluid and scale effect in propeller hydrodynamics // *Voprosy sudostroyeniya (Shipbuilding matters)*, 1982, Issue 32, pp. 93–102 (*in Russian*).

9. *F. Katsman, A. Pustoshny*. Roughness effect calculation methods for propeller power // Research Bulletin of USSR Register of Shipping. 1981, Issue 11, pp. 39–51 (in Russian).
10. *V. Mishkevich*. Consideration of viscosity effect in design and verification propeller calculations as per vortex theory // Transactions of Krylov State Research Institute, 1981, Issue 287. Compendium of papers on hydrodynamics of cargo carriers, pp. 62–73 (in Russian).
11. *Helma S.* An Extrapolation Method Suitable for Scaling of Propellers of any Design // Proceedings of the Fourth International Symposium on Marine Propulsors (SMP'15). Austin : Univ. of Texas at Austin, [2015]. P. 452–465.
12. *Meyne K.* Experimentelle und theoretische betrachtungen zum maßstabeffekt bei modellpropeller-untersuchungen // Schiffstechnik. 1968. Vol. 77. No. 15. P. 45–39.
13. Development of a Strip Method Proposed as New Standard for Propeller Performance Scaling / *H. Streckwall, L. Greitsch, J. Müller* [et al.] // Ship Technology Research. 2013. Vol. 60. No. 2. P. 58–69. DOI: 10.1179/str.2013.60.2.002.
14. Propulsion Committee: Final Report and Recommendations to the 28th ITTC // Proceedings of 28th International Towing Tank Conference: in 2 vol. Zürich: ITTC, 2017. Vol. 1. P. 69–130.
15. Scale effects in open water test results for performance prediction of conventional and unconventional propellers / *R. Quereda, C. Soriano, M. Perez-Sobrino* [et al.] // Ingeniería naval académica. 2016. April (No. 5). P. 215 (35 p.). URL: <https://sectormarítimo.es/wp-content/uploads/2016/04/5-01-INA.pdf> (accessed: 24.11.2021).
16. Comparison of Different Scaling Methods for Model Tests with CLT Propellers / *J. González-Adalid* [et al.] // Proceedings of the 11th International Conference on Hydrodynamics (ICHHD 2014). Singapore, 2014. 8 p. URL: <http://www.sinm.it/sites/default/files/ICHHD2014-CLT.pdf> (accessed: 24.11.2021).
17. *Park H.-G., Choi J.-K., Kim H.-T.* An Estimation Method of Full Scale Performance for Pulling Type Podded Propellers // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2014. Vol. 6. No. 4. P. 965–980. DOI: 10.2478/IJNAOE-2013-0225.
18. *Veikonheimo T., Miettinen P., Huisman J.* On the advanced extrapolation method for a new type of podded propulsor via CFD simulations and model measurements // Proceedings of the Fifth International Symposium on Marine Propulsors (SMP'17). Espoo : VTT Technical Research Center, 2017. P. 409–416.
19. *Lin T.-Y., Kouh J.-S.* On the Scale Effect of Thrust Deduction in a Judicious Self-Propulsion Procedure for a Moderate-Speed Containership // Journal of Marine Science and Technology. 2015. Vol. 20. No. 2. P. 373–391. DOI: 10.1007/s00773-014-0289-7.
20. *Ponkratov D., Zegos C.* Validation of ship scale CFD self-propulsion simulation by the direct comparison with sea trial results // Proceedings of the Fourth International Symposium on Marine Propulsors (SMP'15). Austin : Univ. of Texas at Austin, [2015]. P. 289–299.
21. Open Water results comparison for three propellers with transition model, applying crossflow effect, and its comparison with experimental results / *A. Moran-Guerrero, J. Gonzalez-Adalid, M. Perez-Sobrino, L. Gonzalez-Gutierrez* // Proceedings of the Fifth International Symposium on Marine Propulsors (SMP'17). Espoo : VTT Technical Research Center, 2017. P. 690–697.
22. *A. Yakovlev, Z. Thant.* Numerical-empirical evaluation method of hydrofoil section drag in wide range of Reynolds number // *Marine Intellectual Technologies*, 2019, No. 2(44), v. 1, pp. 21–25 (in Russian).
23. *A. Yakovlev, Z. Thant.* Numerical-empirical evaluation method of hydrofoil section characteristics // *Marine Intellectual Technologies*, 2019, No. 4, Part 1, pp. 29–33 (in Russian).
24. *A. Yakovlev, Z. Thant.* Scale effect evaluation method of hydrofoil sections // *Marine Intellectual Technologies*, 2020, No. 1(47), Part 3, pp. 25–29 (in Russian).
25. *Jacobs E.N., Sherman A.* Airfoil section characteristics as affected by variations of the Reynolds number: Report No. 586 // Twenty-third annual report of the National Advisory Committee for Aeronautics: 1937: including technical reports Nos. 577 to 611. Washington : US Government Printing Office, 1938. P. 227–267.
26. *A. Yakovlev, Z. Thant.* Scale effect evaluation method of axisymmetric body in longitudinal flow // *Marine Intellectual Technologies*, 2020, No. 2, Part 2, pp. 28–34 (in Russian), DOI: 10.37220/MIT.2020.48.2.041.
27. *V. Bushkovsky, A. Yakovlev.* Boundary element method in flow calculation of axially symmetric bodies // Transactions of Krylov State Research Centre, 2008, Issue 36(321), pp. 187–200 (in Russian).
28. *Gertler M.* Resistance Experiments on a Systematic Series of Streamlined Bodies of Revolution: For Application to the Design of HighSpeed Submarines / Navy Department. Alexandria: DTIC, 1950. 139, [2] p. (David Taylor Model Basin Rept.; No. C-297).
29. *Cebeci T., Mosinskis G.J., Smith A.M.O.* Calculation of viscous drag and turbulent boundary-layer separation on two-dimensional and axisymmetric bodies in incompressible flows. Long Beach, 1970. 90 p. (McDonnell Douglas Rept.; No. MDC J0973-01).
30. *A. Yakovlev.* Calculation method for pulling podded propulsor characteristics and its application for the prac-

- tical tasks // *Marine Intellectual Technologies*, 2018, No. 4(42), Part 1, pp. 88–94 (*in Russian*).
31. *Carlton J.S.* Marine propellers and propulsion. 3rd ed. Amsterdam [et al.] : Elsevier, 2012. XXI. 516 p.
 32. *Savio L., Sileo L., Ås S.K.* A Comparison of Physical and Numerical Modeling of Homogenous Isotropic Propeller Blades // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2020. Vol. 8, No. 1. P. 21 (22 p.). DOI: 10.3390/jmse8010021.

Сведения об авторах

Яковлев Алексей Юрьевич, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой гидроаэромеханики и морской акустики ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». Адрес: 190121, Россия, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, д. 3. E-mail: kgm@smtu.ru.

Тхант Зин, к.т.н., инженер-офицер, ВМС Мьянмы, аспирант кафедры гидроаэромеханики и морской акустики ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». Адрес: 11291-11293, Мьянма, Танлын, Штаб-квартира Военно-морской верфи. E-mail: Dolphinlover4922@gmail.com.

About the authors

Alexey Yu. Yakovlev, Dr. Sci. (Eng.), Associate Prof., Head of Hydroaeromechanics and Marine Acoustics Department, St. Petersburg State Marine Technical University. Address: 3, Lotsmanskaya st., St. Petersburg, Russia. E-mail: kgm@smtu.ru.

Zin Thant, Cand. Sci. (Eng.), Engineer Officer, Myanmar Navy, Post-Graduate of Hydroaeromechanics and Marine Acoustics Department, St. Petersburg State Marine Technical University. Address: 11291-11293, Naval Dockyards HQ, Thanlyin, Myanmar. E-mail: Dolphinlover4922@gmail.com.

Поступила / Received: 17.11.21
Принята в печать / Accepted: 14.03.22
© Яковлев А.Ю., Тхант Зин, 2022