

УДК 629.5.017:629.584
EDN: NJNVHO

С.Д. Райская¹, Н.В. Маринич² , Ф.Е. Мамонтов²

¹ АО «Санкт-Петербургское морское бюро машиностроения „Малахит“», Санкт-Петербург, Россия

² ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ХОДКОСТИ ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

Объект и цель научной работы. Объектом исследования являются методы расчета ходкости подводных аппаратов (ПА). Цель – разработка метода расчета ходкости ПА, оборудованных движительным комплексом, который предусматривает установку нескольких движителей для обеспечения заданной скорости и работающих за корпусом или в составе корпуса ПА.

Материалы и методы. Рассмотрено несколько методик прогнозирования ходовых качеств ПА и проведена верификация предложенного метода на разрабатываемом телеуправляемом необитаемом подводном аппарате (ТНПА).

Основные результаты. Разработан принцип расчета ходкости, который основан на классической методике расчета. При этом он позволяет исключить из расчета коэффициенты взаимодействия гребного винта (ГВ) с корпусом, поскольку для ПА с вышеуказанным движительным комплексом оценить их невозможно.

Закключение. Представленный метод расчета ходкости ПА характеризуется быстротой расчета и простотой в использовании, что упрощает разработку многодвижительных систем и дальнейшее проектирование ПА.

Ключевые слова: расчет ходкости, подводный аппарат, гидродинамическое сопротивление, упор винта, движитель, кривые действия гребного винта.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

UDC 629.5.017:629.584
EDN: NJNVHO

S.D. Rayskaya¹, N.V. Marinich² , F.Ye. Mamontov²

¹ JSC St. Petersburg Marine Engineering Bureau Malakhit, St. Petersburg, Russia

² Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

PROPULSION PERFORMANCE CALCULATION PROCEDURE FOR REMOTELY OPERATED VEHICLE

Object and purpose of research. This paper discusses propulsion performance calculation methods for unmanned underwater vehicles (UUVs). The purpose was to develop the procedure of propulsion performance calculation for UUVs with multiple propellers built into UUV body or installed behind it to ensure required speed.

Materials and methods. The paper discusses several prediction procedures for UUV propulsion performance and verifies suggested method on the case study of remotely operated vehicle (ROV) under design.

Main results. The principle of propulsion performance calculation developed by the authors is based on the classic approach but can proceed without coefficients of propeller-hull interaction coefficients because they are impossible to estimate for ROVs with multiple propellers.

Conclusion. The method of UUV propulsion performance calculation suggested by the authors is fast and handy, and will certainly facilitate the development of multi-propeller systems and further UUV design.

Keywords: propulsion performance calculation, UUV, hydrodynamic resistance, propeller thrust, propulsor, performance curves.

The authors declare no conflicts of interest.

Для цитирования: Райская С.Д., Маринич Н.В., Мамонтов Ф.Е. Методика расчета ходкости телеуправляемого необитаемого подводного аппарата. Труды Крыловского государственного научного центра. 2025; 4(414): 47–53.

For citations: Rayskaya S.D., Marinich N.V., Mamontov F.Ye. Propulsion performance calculation procedure for remotely operated vehicle. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2025; 4(414): 47–53 (in Russian).

Введение

Introduction

В настоящее время существует множество методик расчета ходкости и тяговых характеристик одно-вальных судов, приведенных в [1, 2]. В указанных методиках прогнозирование ходовых характеристик осуществляется на предположении о разделении корпуса судна и гребного винта, прозвучавшем в начале XX в. [3]. В результате данного разделения в расчет ходкости введена система коэффициентов взаимодействия.

Данная методика получила наибольшее распространение и часто называется классической. Она успешно применяется и для определения характеристик ходкости самоходных необитаемых подводных аппаратов веретенообразной формы [4]. Для определения коэффициентов взаимодействия проводятся испытания ГВ в свободной воде и самоходные испытания моделей судов. По результатам испытаний строятся зависимости коэффициента упора (K_T), коэффициента упора ГВ с учетом направляющей насадки (K_{TT}) и коэффициента момента (K_Q) от поступи ГВ (J). Далее из условия равенства упоров и оценки коэффициента полезной тяги (K_E) определяются коэффициенты взаимодействия.

Также существует методика комплексного компьютерного проектирования движителя в насадках, которая включает методику определения коэффициентов взаимодействия движителя в насадке с осесимметричным центральным телом. Описание методики приведено в диссертационной работе [5].

Вышеприведенные методики позволяют оценить коэффициенты взаимодействия для одного движителя, работающего за корпусом. Однако для ПА, конструкция которых предусматривает установку нескольких движителей за корпусом или по периметру корпуса ПА, например, при рассмотрении телеуправляемого необитаемого подводного аппарата Triton 3000M XLX 15 [6], они не позволяют оценить коэффициенты взаимодействия для каждого движителя. Это связано с тем, что оценка коэффициентов взаимодействия предполагает проведение самоходных испытаний и установку всех движителей, в частности четырех для ТНПА, что в условиях модельных испытаний невозможно.

Стоит отметить, что в учебном пособии [7] приведена методика расчета ходкости для ПА с движительным комплексом, состоящим из i движителей, при этом коэффициенты взаимодействия приняты для всех движителей одинаковыми, что

подразумевает лишь одно положение за корпусом. Также существует схема расчета ходкости для подводных лодок; расчеты проводятся с использованием полученных в эксперименте значений эффективной тяги движителя при полном геометрическом подобии модели ГВ (и других конструктивных элементов движителя) с учетом масштабного эффекта.

Целями исследования являются разработка метода расчета ходкости ПА при совместной работе его элементов движительного комплекса на основе классической методики, а также его верификация на разрабатываемом ТНПА. Следует учесть, что данный метод предполагает проведение испытаний каждого движителя с элементом корпуса, поскольку проведенные испытания позволяют исключить определение коэффициентов взаимодействия. Однако предложенный метод не учитывает влияние потока, создаваемого ГВ одного движителя, на работу ГВ другого движителя.

Определение кривых действия гребного винта, необходимых для расчета ходкости многодвигательных подводных аппаратов

Determination of propeller performance curves needed to calculate propulsion performance of multi-propeller UUVs

В рамках данной работы на примере разрабатываемого ТНПА (на рис. 1 представлен схожий аппарат) рассмотрим результаты испытаний по определению кривых действия движителей, которые проводились в ФГУП «Крыловский государственный научный центр» в большой скоростной гидродинамической трубе на макете маршевой колонки (МК) в следующем объеме [8]:

- испытания макета МК на переднем и заднем ходу при углах поворота МК 0° и 45° в свободной воде;
- испытания макета МК на переднем и заднем ходу при углах поворота МК 0° и 45° с имитацией фрагментов корпуса.

Испытания в свободной воде позволяют оценить тяговые характеристики движителей без учета корпуса и получить зависимости: $K_T(J)$, $K_{TT}(J)$, $K_Q(J)$. Далее по классической модели определения кривых действия ГВ и оценки эффективной тяги движителя, работающего за корпусом, проводят самоходные испытания. Однако в связи с тем, что выполнение указанного вида испытаний для данного

ПА в условиях модельных испытаний невозможно, были проведены испытания макета МК с имитацией фрагментов корпуса, позволяющие получить зависимости $K_E(J)$ и $K_Q(J)$.

Поскольку косое обтекание ГВ приводит к изменению поля скоростей и давлений в диске ГВ, а, соответственно, и к изменению кривых действия ГВ, требуется также проведение испытаний при угле поворота макета МК 45° в свободной воде и с имитацией корпуса для определения зависимостей: $K_{T45}(J)$, $K_{TT45}(J)$, $K_{E45}(J)$ и $K_{Q45}(J)$.

Результаты гидродинамических испытаний макета МК в статье приведены только на передний ход и представлены на рис. 2–4. Стоит отметить, что чем больше угол скоса (поворота макета МК), тем сильнее снижаются упор и КПД ГВ. При этом потеря упора, а значит, и меньшие значения коэффициента упора $K_{TT45}(J)$, $K_{E45}(J)$, не прямо пропорциональны косинусу угла поворота МК. Данные зависимости также приведены на рис. 2–4:

$$K'_{TT45}(J) = K_{TT}(J) \cdot \text{Cos}(45);$$

$$K'_{E45}(J) = K_E(J) \cdot \text{Cos}(45).$$

Приведенное сопоставление на рис. 2–4 показывает, что значения коэффициентов $K_{TT45}(J)$,

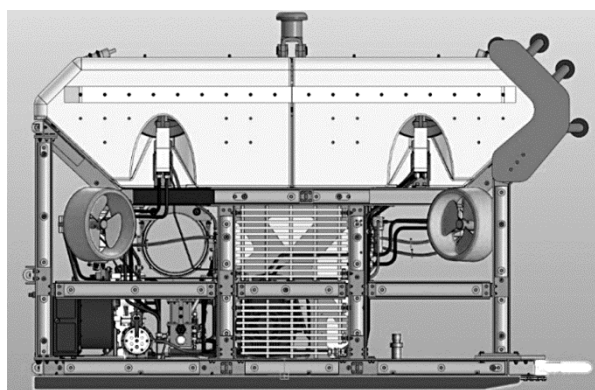


Рис. 1. Общий вид телеуправляемого необитаемого подводного аппарата

Fig. 1. General view of ROV-type unmanned underwater vehicle

$K_{E45}(J)$, определенные экспериментальным методом, и значения коэффициентов $K'_{TT45}(J)$, $K'_{E45}(J)$, полученные путем умножения коэффициентов упора (под углом 0°) на косинус 45° , отличаются друг от друга.

Таким образом, определение кривых действия ГВ, необходимых для расчета ходкости ТНПА, требует проведение испытаний макета МК с имитаци-

Рис. 2. Кривые действия гребного винта в свободной воде

Fig. 2. Open-water propeller performance curves

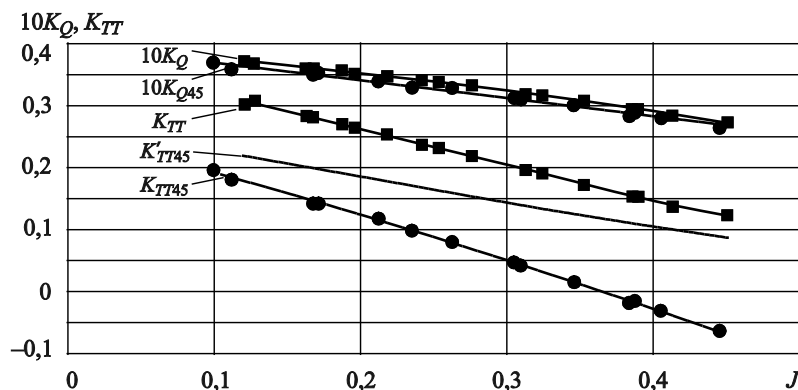
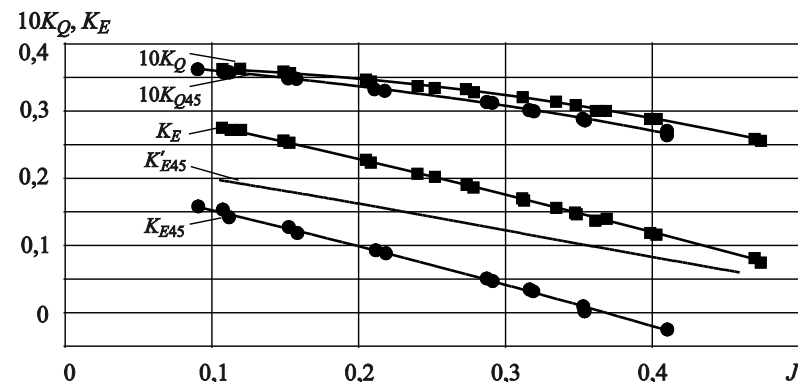


Рис. 3. Кривые действия гребного винта с имитацией корпуса для переднего движителя

Fig. 3. Propeller performance curves in presence of hull dummy: forward propeller



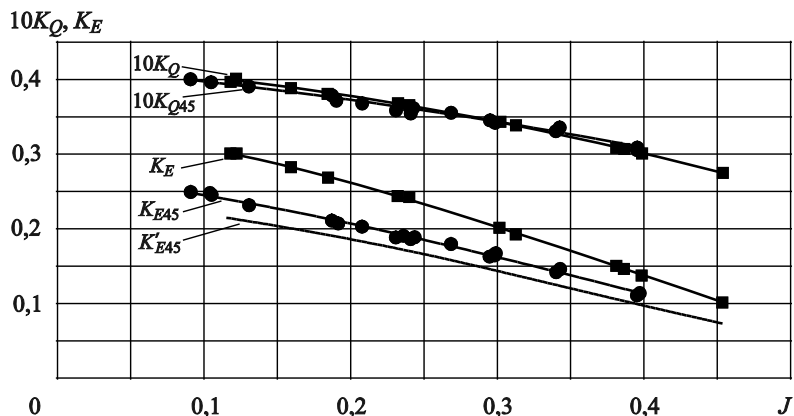


Рис. 4. Кривые действия гребного винта с имитацией корпуса для заднего движителя

Fig. 4. Propeller performance curves in presence of hull dummy: aft propeller

ей корпуса и под углом поворота МК, соответствующим углу натекания потока жидкости при движении ТНПА передним ходом.

Описание метода расчета ходкости ПА и его верификация

Description and verification of propulsion performance calculation method

Перед тем как переходить к описанию метода расчета ходкости ПА, необходимо ввести ряд обозначений и формул:

ρ – плотность жидкости, т/м³;

V – полное подводное возмещение ПА, м³;

v_i – скорость хода ПА, м/с;

v_{ip} – скорость потока в диске ГВ, м/с;

v_{PH} – заданная скорость полного хода ПА, м/с;

n – частота вращения ГВ, об/с;

n_n – номинальная частота вращения ГВ, об/с;

P – мощность на ГВ, кВт;

P_n – номинальная мощность на ГВ, кВт;

M – момент ГВ за корпусом, Н·м;

D – диаметр ГВ, м;

T_E – эффективная тяга, кН;

$J = \frac{v_{ip}}{n \cdot D}$ – поступь ГВ за корпусом;

$K_E = \frac{T_E}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4}$ – коэффициент полезной тяги ГВ;

$K_Q = \frac{M}{\rho \cdot n^2 \cdot D^5}$ – коэффициент момента ГВ.

Для расчета ходкости рассматриваемого объекта введены коэффициенты нагрузки по тяге и моменту ГВ при работе каждого j -го движителя

в составе корпуса ПА, позволяющие исключить из расчета коэффициенты взаимодействия:

$$C_{Tj} = \frac{T_{Ej}}{V^{2/3}} \cdot \frac{2}{\rho \cdot v_i^2};$$

$$C_{Nj} = \frac{M_j \cdot n_j}{V^{2/3}} \cdot \frac{2}{\rho \cdot v_i^3}.$$

Таким образом, в разрабатываемой методике под коэффициентами нагрузки понимается отношение полезной тяги или мощности ГВ к полному подводному водоизмещению ПА и скоростному напору.

После введения понятия коэффициентов нагрузки и с учетом формул, представленных выше, окончательно получаем соотношения:

$$C_{Tj} = \frac{2 \cdot K_{Ej}}{J_j^2} \cdot \frac{D_j^2}{V^{2/3}};$$

$$C_{Nj} = \frac{2 \cdot K_{Qj}}{J_j^3} \cdot \frac{D_j^2}{V^{2/3}}.$$

В связи с тем, что данная методика основывается на предположении о разделении ГВ и корпуса ПА, введем коэффициенты сопротивления ПА и мощности:

$$C_R = \frac{2 \cdot R_i}{\rho \cdot v_i^2 \cdot V^{2/3}};$$

$$C_{Ni} = \frac{P_i}{\pi \cdot \rho \cdot v_i^3 \cdot V^{2/3}}.$$

Данная методика базируется на условии, что мощность на ГВ или частота вращения на всех движи-

телях будет одинаковой. Условие по мощности представлено следующим равенствами:

$$\sum_j C_{Tj} = C_R;$$

$$C_{Nj} = C_{Ni}.$$

Таким образом, при выполнении условий равенства, необходимых для обеспечения заданной i -й скорости хода ПА, расчет величины мощности P , которая для всех движителей является одинаковой, и частоты вращения n_j для каждого j -го движителя осуществляется в итерациях. В качестве начальных значений при любом значении скорости хода v_i величины C_{Tj} и C_{Nj} принимаются равными нулю.

Предложенный метод расчета был протестирован на разрабатываемом в настоящее время ТНПА (рис. 1), для которого ранее в ФГУП «Крыловский государственный научный центр» был проведен комплекс экспериментальных исследований по определению буксировочного сопротивления и кривых действия движителей [8], рассмотренных выше.

Как видно из рис. 1, для обеспечения переднего хода на ТНПА по векторной схеме (под углом в 45° относительно ДП) расположено четыре движителя с одинаковыми ГВ и механическими характеристиками. Для каждой пары движителей (передние и задние) были аппроксимированы кривые действия ГВ, а затем добавлены в программу расчета. Коэффициент сопротивления ТНПА на передний ход, с учетом не моделируемых частей корпуса и оборудования, в расчете принят 0,835. Общая схема расчета по разработанной методике для ТНПА представлена на рис. 5.

Следует отметить, что для ПА, имеющего такое большое буксировочное сопротивление, значением силы засасывания (увеличение буксировочного сопротивления из-за работы движителя), на преодоление которой тратится часть упора ГВ за корпусом, можно пренебречь.

На рис. 6 показаны зависимости мощности и частоты вращения каждой пары движителей в относительных величинах, получившихся в результате расчета описанным выше методом. Расчет дает значительно близкие значения величин (расхождение не более 1 %) относительно расчета ходкости, проведенного в ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Это позволяет применить данный метод при прогнозировании ходкости ПА с конструкцией движительного комплекса, который состоит из нескольких движителей, работающих в составе корпуса ПА.

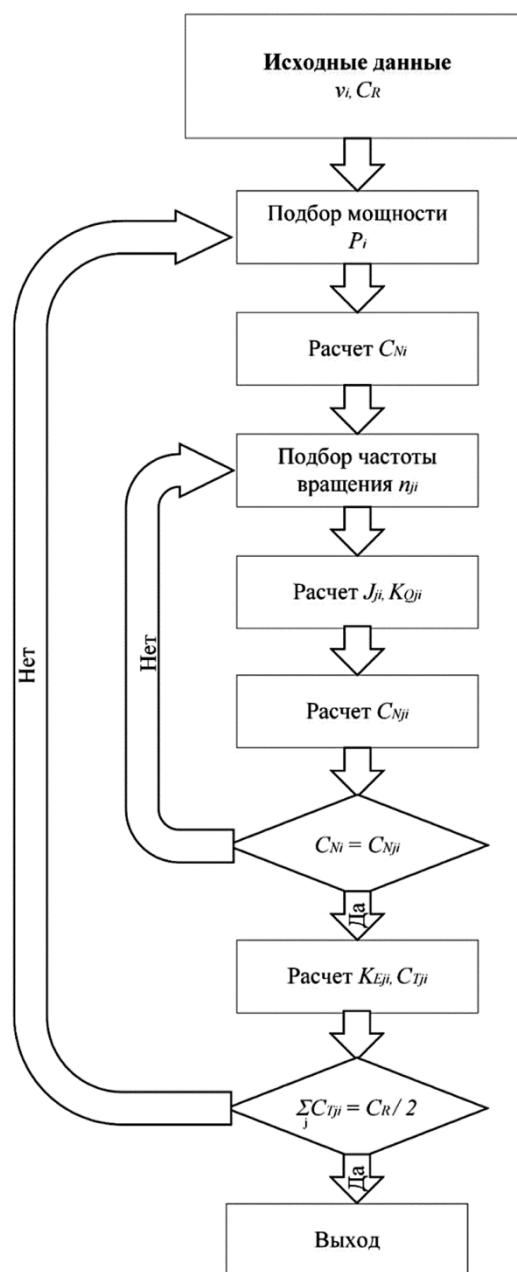


Рис. 5. Схема расчета ходкости по предложенной методике

Fig. 5. Layout of propulsion performance calculation as per suggested approach

На рис. 7 показано отношение частоты вращения передней (n_1) и задней пары движителей (n_2). Как видно, разность в частоте вращения между передней и задней парой движителей составляет около 3,5 %.

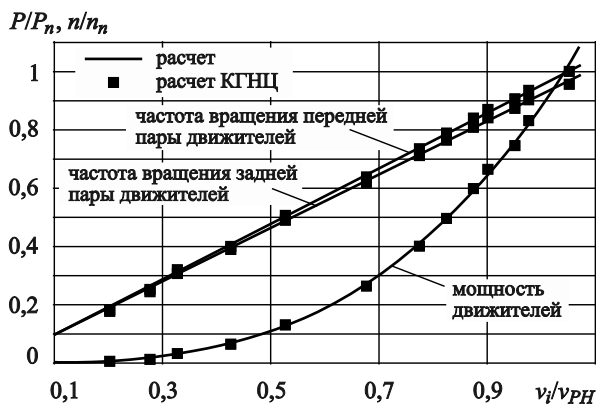


Рис. 6. Сравнение расчета мощности двигателя и частоты вращения каждой пары движителей с расчетом ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (на схеме – КГНЦ)

Fig. 6. Engine power and RPM of each propeller couple: comparison with KSRС calculation

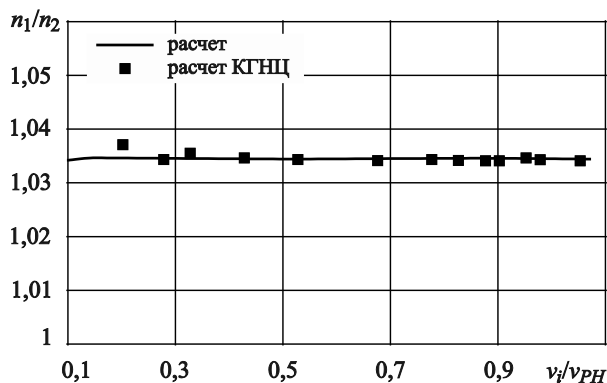


Рис. 7. Зависимость отношения частоты вращения передней и задней пары движителей от скорости хода телеуправляемого необитаемого подводного аппарата

Fig. 7. RPM of forward and aft propeller couples vs ROV speed

Основное преимущество предложенного метода заключается в исключении необходимости определения коэффициентов взаимодействия, которые для многодвигательных систем становятся взаимозависимыми и не могут быть оценены традиционными способами. В отличие от подхода, описанного в [7], данный метод позволяет учитывать индивидуальный вклад каждого двигателя через коэффициенты нагрузки. На основании данного подхода возможна разработка алгоритма оптимизации распределения мощности или частоты вращения между двигателями в зависимости от режимов работы ПА.

Заключение

Conclusion

Классический подход расчета ходкости не работает, чтобы решить задачу по оценке мощности и частоты вращения двигателей, работающих совместно и обеспечивающих заданную скорость ПА. Решить поставленную задачу позволяет проведение дополнительных испытаний макета(ов) двигателей с имитацией корпуса ПА и установкой их под углом поворота, соответствующему углу натекания потока жидкости при движении ПА передним ходом, а затем проведение расчета ходкости по предложенной методике с учетом разнотяговости на передней и задней паре движителей, в частности для ТНПА.

В связи с тем, что при проектировании ТНПА экспериментальной оценки гидродинамического воздействия между двигателями не проводилось, описанный выше метод не учитывает перераспределение действующих сил при их совместной работе. Однако верификация метода на примере ТНПА подтвердила возможность замены классических коэффициентов взаимодействия на коэффициенты нагрузки, что упрощает анализ многодвигательных систем.

Таким образом, представленный метод расчета ходкости отличается быстротой вычислений и удовлетворительной точностью. Полученные результаты расчета ходкости ТНПА свидетельствуют о возможности применения разработанного метода для оценки ходкости подводных аппаратов, оборудованных двигательным комплексом, который предусматривает установку нескольких двигателей для обеспечения заданной скорости и работающих за корпусом или в составе корпуса ПА.

Список использованной литературы

1. Басин А.М., Миниович И.Я. Теория и расчет гребных винтов. Ленинград : Судпромгиз, 1963. 760 с.
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., Щербаков И.В. Швартовая система коэффициентов взаимодействия гребных винтов с корпусом // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2011. Вып. 59(343). С. 77–88.
4. Самоходные необитаемые подводные аппараты / [Ю.А. Боженов, А.П. Борков, В.М. Гаврилов и др.]. Ленинград : Судостроение, 1986. 262, [1] с. (Техника освоения океана).

5. *Маринич Н.В.* Проектирование перспективных движителей в насадке с учетом их взаимодействия с поворотной колонкой и элементами корпуса судна : дис. ... канд. техн. наук / Крыловский государственный научный центр. Санкт-Петербург, 2013. 116 с.
6. ОКЕАН.ТНПА-МАКС / *Меркулов А.С., Увакина Д.В., Павлова А.В.* [и др.] // XXII конкурс асов 3D-моделирования : [сайт] / АСКОН. [Б. м.], 2024. URL: <https://best.ascon.ru/gallery/33161/> (дата обращения: 08.09.2025).
7. *Слижевский Н.Б.* Ходкость и управляемость подводных технических средств : учебное пособие. Николаев : УГМТУ, 1998. 148 с.
8. Проведение расчетно-экспериментальных исследований в обоснование гидродинамических характеристик комплекса с телеуправляемым необитаемым подводным аппаратом рабочего класса : отчет / Крыловский государственный научный центр ; рук. *Григорьев М.Ю.* Санкт-Петербург, 2024. 90 с. Вып. 49993.
9. *Marinich N.V.* Design of advanced ducted propellers taking into account their interaction with azimuthal thruster and hull elements. Cand. Sci. Theses. St. Petersburg : Krylov State Research Centre, 2013. 116 p. (*in Russian*).
10. OCEAN.ROV-MAX / *A.S. Merkulov, D.V. Uvakina, A.V. Pavlova* [et al.] // 22nd AceCon contest of 3D simulation cases : [site]. 2024. URL: <https://best.ascon.ru/gallery/33161>, (Accessed: 08.09.2025) (*in Russian*).
11. *Slizhevsky N.B.* Propulsion performance and maneuverability of underwater vehicles: Student's Guide. Nikolaev : UGMTU, 1998. 148 p. (*in Russian*).
12. Analytical and experimental studies to justify hydrodynamic parameters of system with industrial-grade ROV : Report / Krylov State Research Centre. Work supervisor *M.Yu. Grigorov*. No. 49993. St. Petersburg, 2024. 90 p. (*in Russian*).

References

1. *Basin A.M., Miniovich I.Ya.* Theory and calculation of propellers. Leningrad : Sudpromgiz, 1963. 760 p. (*in Russian*).
2. Handbook of ship theory. In 3 volumes. Vol. 1. Hydro-mechanics. Ship resistance. Ship propulsors / [*Ya.I. Voitkunksky et al.*]. Leningrad : Sudostroenie, 1985. 764 p. (*in Russian*).
3. *Kanevsky G.I., Klubnichkin A.M., Scherbakov I.V.* Bollard-pull system of propeller-hull interaction coefficients // Transactions of Krylov Central Research Institute. 2011. Vol. 59(343). P. 77–88 (*in Russian*).
4. Self-propelled UUVs / *Yu.A. Bozhenov, A.P. Borkov, V.M. Gavrilov* [et al.]. Leningrad : Sudostroenie, 1986. 262 [1] p. (*in Russian*).
5. *Marinich N.V.* Design of advanced ducted propellers taking into account their interaction with azimuthal thruster and hull elements. Cand. Sci. Theses. St. Petersburg : Krylov State Research Centre, 2013. 116 p. (*in Russian*).
6. OCEAN.ROV-MAX / *A.S. Merkulov, D.V. Uvakina, A.V. Pavlova* [et al.] // 22nd AceCon contest of 3D simu-

Сведения об авторах

Райская Светлана Дмитриевна, инженер-конструктор 1-й категории АО «СПМБМ „Малахит“». Адрес: 196135, Россия, Санкт-Петербург, ул. Фрунзе, д. 18. Тел.: +7 (812) 242-15-80. E-mail: revkovasv@gmail.com.

Маринич Николай Владимирович, к.т.н., начальник 22 лаборатории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 386-67-49. E-mail: N_marinich@ksrc.ru. <https://orcid.org/0000-0002-9290-3041>.

Мамонтов Федор Евгеньевич, инженер 1-й категории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. E-mail: fedor.mamontov26@mail.ru.

About the authors

Svetlana D. Rayskaya, 1st Category Engineer/Designer, Malachite Design Bureau. Address: 18, Frunze st., St. Petersburg, Russia, post code 196135. Tel.: +7 (812) 242-15-80. E-mail: revkovasv@gmail.com.

Nikolay V. Marinich, Cand. Sci. (Eng.), Head of Laboratory, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 386-67-49. E-mail: N_marinich@ksrc.ru. <https://orcid.org/0000-0002-9290-3041>.

Fyodor Ye. Mamontov, 1st Category Engineer, Krylov State Research Centre Address: 18, Frunze st., St. Petersburg, Russia, post code 196135. Tel.: +7 (812) 386-67-49. E-mail: fedozeche@mail.ru.

Поступила / Received: 18.09.25

Принята в печать / Accepted: 13.11.25

© Райская С.Д., Маринич Н.В., Мамонтов Ф.Е., 2025