

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-4-386-56-61
УДК 532.58.001.24

А.Ю. Яковлев¹, О.П. Орлов¹, А.Ш. Ачкинадзе², И.К. Бородай¹, А.А. Родионов²

¹ ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

² ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», Санкт-Петербург, Россия

МОДИФИКАЦИЯ МЕТОДА УЧЕТА ВЯЗКОСТИ СРЕДЫ ПРИ ОЦЕНКЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ

Объект и цель научной работы. Объектом исследования являются движители нетрадиционных типов, то есть отличные от гребного винта. Цель исследования – применить результаты численных исследований фундаментальных научных проблем, проведенных в Крыловском государственном научном центре (КГНЦ), для проектирования движителей новых (нетрадиционных) типов.

Материалы и методы. В работе проанализированы проблемы разработки движителей нетрадиционных типов, таких как главные винто-рулевые колонки, движители CRPOD и RSN, движитель с кольцевым приводом, а также различные типы водометных движителей. Проанализированы проведенные ранее исследования и разработанные математические модели, посвященные решению фундаментальных проблем в области судовых движителей. Представлены концепции использования данных методов при проектировании новых типов судовых движителей и достигнутые с их помощью результаты.

Основные результаты. Основным результатом работы является формирование единой картины создания различных типов современных движителей. Для ряда типов движителей представлены концепции их разработки с использованием численных методов и продемонстрирована эффективность разработанных методов.

Заключение. Теоретическая значимость работы состоит в формулировке единых способов подхода к разработке движителей новых типов. Работа демонстрирует связь результатов фундаментальных исследований, проводимых в КГНЦ, с решением конкретных практических задач.

Ключевые слова: движитель, водомет, винто-рулевая колонка, концевой привод, насадка, проектирование, расчет.
Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-4-386-56-61
UDC 532.58.001.24

A. Yakovlev¹, O. Orlov¹, A. Achkinadze², I. Boroday¹, A. Rodionov²

¹ Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

² St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

MODIFIED VISCOSITY CONSIDERATION METHOD IN FOIL RESISTANCE ASSESSMENT

Object and purpose of research. This paper studies non-conventional propulsors. The purpose of the study is to apply the results of fundamental numerical studies performed by KSRC to practical design of non-conventional propulsors.

Materials and methods. The study analyses developments of non-conventional propulsors, e.g. pod propulsion units, CRPOD and RSN propulsors, rim-driven thrusters, as well as waterjets of various types. It also discusses previous studies and mathematical models dedicated to fundamental challenges in marine propulsion and presents the concepts of how these methods could be applied in design of non-conventional marine propulsors and what results this could yield.

Main results. This study gives a comprehensive picture of how various types of modern propulsors are designed. For a number of propulsors, it gives their development concepts based on numerical methods, demonstrating that these methods are truly efficient.

Для цитирования: Яковлев А.Ю., Орлов О.П., Ачкинадзе А.Ш., Бородай И.К., Родионов А.А. Модификация метода учета вязкости среды при оценке сопротивления гидродинамического профиля. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; 386(4): 56–61.

For citations: Yakovlev A., Orlov O., Achkinadze A., Boroday I., Rodionov A. Modified viscosity consideration method in foil resistance assessment. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; 386(4): 56–61 (in Russian).

Conclusion. Theoretical value of this work is that it formulates integrated approaches to design of non-conventional propulsors and demonstrates how useful the results of fundamental studies performed in KSRC could prove in overcoming practical design challenges.

Keywords: propulsor, water jet, pod propulsion unit, end drive, nozzle, design calculation.

Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

Введение

Introduction

Современные численные методы, применяемые для решения гидродинамических задач, подразделяются на методы расчета вязких турбулентных течений, которые основаны на решении уравнений Навье – Стокса (методы CFD), и методы расчета течений невязкой жидкости, основанные на решении уравнения Лапласа. Несмотря на то, что в основе методов CFD лежит более совершенная математическая модель, методы, моделирующие течение невязкой жидкости, во многих случаях (когда влияние вязкости не велико) обеспечивают достаточную точность решения. Однако для полноценного практического применения этих методов необходимо вводить поправки на вязкость [1]. Подобные поправки особенно актуальны при расчете обтекания профилей крыльев и лопастей гребных винтов.

В последнее время заявило о себе новое направление использования упрощенных методов – реализация методов пересчета характеристик движителей и других устройств с модели на натуру. Для выполнения такого пересчета вводится зависимость характеристик профиля от числа Рейнольдса и параметров течения, охватывающая диапазон от модельных до натуральных размеров. Далее производится анализ данных модельных испытаний и выполняется соответствующий им расчет. Затем осуществляется расчет на натурные условия и вводится интегральная поправка. Такая схема позволяет учесть специфику обтекания различных участков лопастей и крыльев и в конечном итоге точно и оперативно провести оценку натуральных характеристик.

Таким образом, развитие упрощенных методов оценки характеристик профилей крыльев продолжает оставаться актуальным для ряда специфических приложений.

Состояние проблемы

State of the art

В отечественном судостроении в 80-х гг. XX века были разработаны специальные поправки для учета вязкости при расчетах гребных винтов (ГВ) [2]. Они нашли широкое применение в расчетной практике [1, 3].

В исходной формулировке эти поправки вводятся на влияние вязкости жидкости при вычислении подъемной силы и сопротивления на основе теоретического решения для тонкого профиля. Причем вязкость жидкости учитывается при определении градиента подъемной силы (dC_L/da) и угла нулевой подъемной силы (α_0) путем введения поправочных коэффициентов μ и κ , что приводит к следующему выражению для C_L [2]:

$$C_L = 2\pi\alpha(\alpha + 2\kappa\delta_c), \quad (1)$$

где α – угол атаки профиля; δ_c – максимальная кривизна (стрелка прогиба) профиля, отнесенная к длине его хорды.

Выбор поправочных коэффициентов для профилей сечений, характерных для лопастей гребных винтов, основан на результатах исследования В.Г. Мишкевича [2], в котором рекомендованы следующие аппроксимационные зависимости для профилей с распределением нагрузки типа NACA a = 0,8 и толщины типа NACA-66:

$$\mu = (1 + 0,87\delta) \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{-0,0691 + 12,46\delta}{-0,1855 \ln Re_s}\right) \right], \quad (2)$$

$$\kappa = 1,015 \left[1 + \frac{\delta(\delta - 0,05)}{(0,04664 \ln Re - 0,4378)^2} \right],$$

где $Re = V_0 \cdot C/v$; v – коэффициент вязкости воды; C – длина хорды профиля; δ – максимальная толщина профиля, отнесенная к длине его хорды; V_0 – скорость потока, натекающего на профиль.

Кроме того, в [2] представлено выражение для коэффициента обратного качества того же профиля, которое позволяет получить выражение для коэффициента сопротивления:

$$C_D = \frac{0,05808(1 + 2,3\delta)}{Re^{0,1458}}. \quad (3)$$

В силу широкого распространения профилировки NACA66 при проектировании ГВ и малого отличия от нее большинства других применяемых на практике профилей, принято считать, что расчет коэффициентов сил, действующих на элемент лопасти ГВ, можно осуществлять с использованием формул (1), (2) и (3) вне зависимости от формы профиля цилиндрического сечения лопасти.

Однако в действительности область применения этих поправок имеет узкий диапазон применимости [2]:

$$0 \leq \delta \leq 0,10, 0 \leq \delta_c \leq 0,03, \\ -0,1 \leq C_L \leq 0,3, Re \geq 10^5 \quad (4)$$

Выход за эти ограничения и изменение формы профиля могут приводить к существенным ошибкам. К сожалению, практика использования поправок (2), (3) показала, что подобные ситуации нередки. По этой причине необходимо разработать поправки на вязкость, имеющие более широкий диапазон применимости по сравнению с (4).

Для достижения этой цели будем использовать способ учета вязкости, используемый в работах [4], ориентированных в основном на задачи авиационной техники. Этот способ основан на упрощенных соотношениях, полученных на основе теории пограничного слоя. Поскольку в настоящее время существуют быстрые и эффективные методы расчета профиля в идеальной жидкости, модифицированные поправки должны вводиться именно на эти решения.

Корректировка поправки на сопротивление профиля

Updating foil resistance correction

Как показывает практика, ограничения на область применения поправок В.Г. Мишкевича особенно существенны для расчета сопротивления профиля, поскольку формула (3) не учитывает зависимость от угла атаки. Поправки для подъемной силы (2) мало изменяются в пределах линейного участка зависимости $C_L(\alpha)$, и диапазон их применимости можно теоретически продлить на весь линейный участок. В этой ситуации создание более совершенного

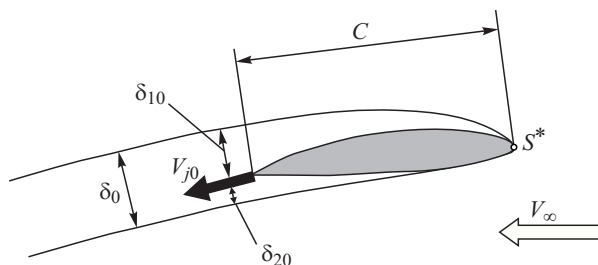


Рис. 1. Пограничный слой на профиле
Fig. 1. Boundary layer

способа расчета коэффициента сопротивления C_X позволит расширить диапазон применимости рассматриваемых поправок и повысить точность расчета характеристик при безотрывном режиме обтекания.

При разработке новой формулы для C_D будем опираться на формулу Сквайра – Юнга [4]:

$$C_D = 2 \left(\frac{V_{j0}}{V_\infty} \right)^{3,2} \frac{\delta_0^{**}}{C}, \quad (5)$$

где V_{j0} – скорость в районе задней кромки; $\delta_0^{**} = \delta_{10}^{**} + \delta_{20}^{**}$ – толщина потери импульса, определяемая из расчета пограничного слоя; индексы $j = 1$ и $j = 2$ соответствуют засасывающей и нагнетающей сторонам профиля.

Для применения формулы (5) необходимо знать скорости на профиле и характеристики пограничного слоя. Для целей данного исследования нет необходимости проводить непосредственный расчет пограничного слоя, достаточно использовать упрощенные зависимости [4]. С этой целью сделаем следующие допущения: пограничный слой полностью турбулентен (начальный ламинарный участок пренебрежимо мал), отрыва пограничного слоя не происходит на всем протяжении профиля, в качестве начальной точки пограничного слоя берется входящая кромка профиля (рис. 1).

В рамках сделанных предположений толщина потери импульса, входящая в выражение (5), может быть получена интегрированием некоторой степенной функции от скорости по поверхности профиля [4]:

$$\delta_j^{**}(s) = 0,00653 \cdot \frac{|V_j(s)|^{1-b}}{(Re^{**})^{\frac{1}{m}}} \cdot \frac{m+1}{m} \int_{S^*}^S |V_j(\tau)|^{b-1} d\tau,$$

где $b = 2 \frac{4m+1}{2m-1}$, $m = 6$; $j = 1, 2$ – определяет засасывающую или нагнетающую сторону; S – длина дуги контура профиля, отсчитываемая от носика профиля ($S = S^*$) вдоль нагнетающей или засасывающей сторон.

Предполагая толщину профиля малой, можно считать, что интегрирование скорости по поверхности профиля эквивалентно интегралу вдоль хорды. Если в этом выражении перейти от числа Рейнольдса, рассчитываемого по толщине потери импульса

$Re^{**} = |V(s)| \delta^{**}(s) \frac{1}{\nu}$, к его традиционному пред-

ставлению $Re = \frac{V_0 C}{\nu}$ и подставить результат в формулу для сопротивления (5), то можно заметить, что абсолютные величины скорости набегающего потока V_0 и длины хорды профиля C сократятся. В результате получается зависимость коэффициента сопротивления C_D от числа Рейнольдса и скорости на поверхности профиля, отнесенной к скорости V_0 . Если просуммировать сопротивление, создаваемое за счет обтекания засасывающей и нагнетающей поверхностей профиля, то получаем следующее выражение для коэффициента сопротивления:

$$C_x = \frac{0,03058}{Re^{1/7}} \sum_{j=1,2} \left[\int_0^1 |\bar{V}_j(\tau)|^{3,545} d\tau \right]^{6/7}, \quad (6)$$

где $\bar{V}_j(\tau)$ – скорость на профиле, отнесенная к скорости набегающего потока; τ – отстояние, отсчитываемое вдоль хорды от носика профиля, отнесенное к длине профиля.

Формула (6) позволяет легко оценить коэффициент сопротивления, если известно распределение скорости на поверхности профиля. Это распределение может быть получено по результатам расчета в рамках идеальной жидкости, например по методу [5]. Таким образом, вычисление поправок на вязкость свелось к использованию результатов расчета обтекания в идеальной жидкости.

При расчете C_D предложенным способом возникает вопрос: насколько хорошо будут согласовываться получаемые оценки сопротивления профилей с расчетом по формуле (3), которая получена путем аппроксимации результатов систематических расчетов?

При малых величинах коэффициента подъемной силы скорости на нагнетающей и засасывающей поверхностях профиля можно считать близкими между собой и равными $1 + 0,75 \cdot \delta$. Тогда, в силу предположения о малости толщины профиля, выставляем при использовании формулы (3) [2], в первом приближении можно считать

$$C_D = \frac{0,06116}{Re^{1/7}} \cdot [1,0 + 2,279 \cdot \delta]. \quad (7)$$

Полученное выражение по своей форме и величинам коэффициентов близко к формуле (3). Сопоставление коэффициентов входящих в формулы (3) и (7) приведено на рис. 2.

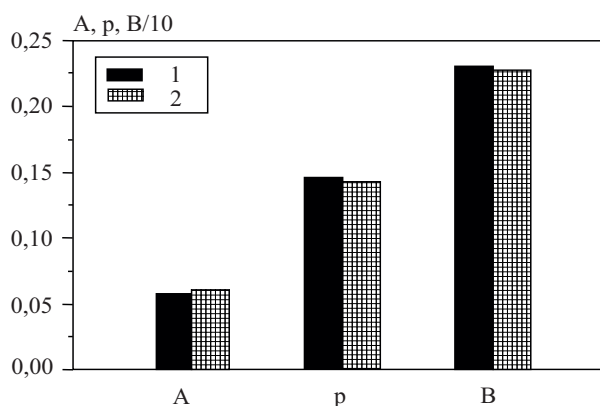


Рис. 2. Сопоставление коэффициентов в формулах (3) и (11): 1 – исходная формула (3); 2 – модифицированная формула (11) при малой величине коэффициента подъемной силы и безударном режиме обтекания

Fig. 2. Comparison of coefficients in Formulae (3) and (11): 1 – initial formula (3); 2 – modified formula (11) with low lift coefficient and impact-free flow

Из приведенного сопоставления следует, что при принципиально различном подходе к выводу выражений (3) и (6) применение этих формул при ограничениях (4) приводит к практически идентичным результатам. Таким образом, полученная в данной работе формула для оценки сопротивления профиля (6) представляет собой распространение формулы (3) на более широкий диапазон углов атаки. Это подтверждает правильность сделанных предпосылок и позволяет ожидать верной оценки сопротивления профиля по формуле (6).

Расчет характеристик профилей

Calculation of foil parameters

В данном разделе рассмотрены примеры расчета характеристик различных профилей по представленному методу.

С целью проверки влияния параметров геометрии профиля на точность оценки коэффициента сопротивления были выполнены расчеты для профилей NACA0006, NACA0012, NACA2312 и NACA2315. Эти профили различаются по толщине и кривизне: профили NACA0006 и NACA0012 имеют симметричный профиль и толщину 6 и 12 % соответственно. Аналогично профили NACA2312 и NACA2315 имеют одинаковую кривизну и толщину 12 и 15 %. Таким образом, 3 из 4 профилей выходят по толщине за пределы диапазонов (4).

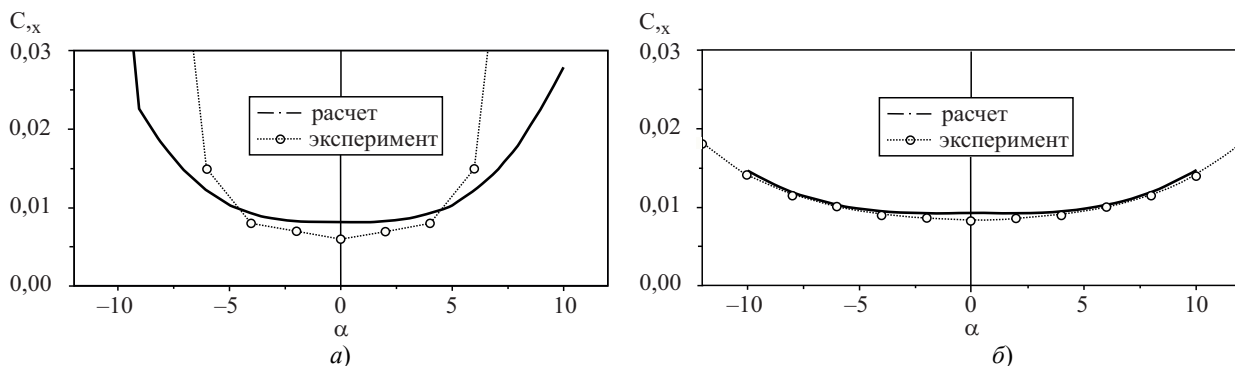


Рис. 3. Зависимость коэффициента сопротивления от угла атаки для профилей семейства NACA00XX: а) NACA0006; б) NACA0012

Fig. 3. Resistance coefficient versus attack angle for NACA00XX foils: a) NACA0006; b) NACA0012

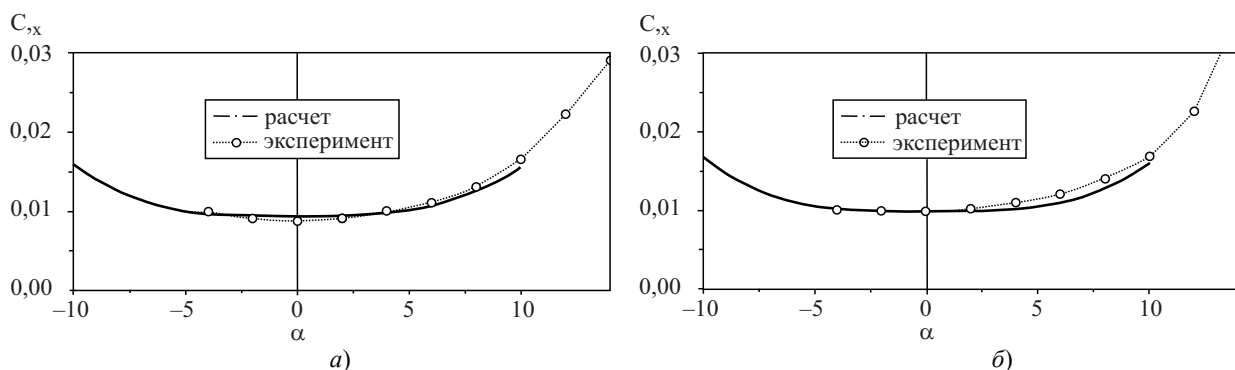


Рис. 4. Зависимость коэффициента сопротивления от угла атаки для профилей NACA23XX: а) NACA2312; б) NACA2315

Fig. 4. Resistance coefficient versus attack angle for NACA23XX foils: a) NACA2312; b) NACA2315

Сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными приведены для профилей NACA0006 и NACA0012 на рис. 3 и для профилей NACA2312 и NACA2315 – на рис. 4. Экспериментальные данные по характеристикам профилей взяты из работы [6]. Как видно, зависимости коэффициента сопротивления от угла атаки в эксперименте имеют существенно нелинейный характер. Расчетные кривые, полученные по предлагаемому способу, также зависят от угла атаки нелинейным образом и хорошо согласуются с экспериментом. Следует иметь в виду, что введенная в [2] поправка (3) не зависит от угла атаки, и при больших углах атаки будет существенно отличаться от эксперимента.

Практически предлагаемые поправки оказываются работоспособными до углов атаки, близких к критическим. В том же диапазоне работают и исходные поправки для подъемной силы (2). Таким образом, удалось добиться одинакового диапазона применимости поправок на вязкость для подъемной силы и сопротивления профиля. На углах атаки,

близких к критическому и превышающих его, происходит отрыв потока, следствием чего является падение подъемной силы и резкий рост сопротивления. Пример такой зависимости представлен на рис. 3а (профиль NACA0006). Здесь рост коэффициента сопротивления начинается при углах атаки больше 5 градусов. Для подобных режимов предлагаемая расчетная схема непригодна, что хорошо видно из рис. 3а.

Заключение

Conclusion

Получено новое представление поправок для сопротивления профиля, основанное на расчете в невязкой жидкости. Это представление имеет расширенный диапазон применимости по сравнению с традиционной поправкой В.Г. Мишкевича [2], вплоть до критических углов атаки. Показано, что в тех случаях, когда поправки В.Г. Мишкевича справедливы, новые поправки практически совпадают с ними.

Библиографический список

1. Справочник по теории корабля. Т.1. Л.: Судостроение, 1985.
2. Бавин В.Ф., Завадовский Н.Ю., Левковский Ю.Л., Мишкевич В.Г. Гребные винты. Современные методы расчета. Л.: Судостроение, 1983.
3. Артюшков Л.С., Ачкинадзе А.Ш., Русецкий А.А. Судовые движители. Л.: Судостроение, 1988.
4. Елизаров А.М., Ильинский Н.Б., Потапьев А.В. Обратные краевые задачи аэродинамики. М.: Физматлит ВО «Наука», 1994
5. Амромин Э.Л., Васильев А.В. К расчетам потенциального обтекания плоского профиля вихревым методом // Вопросы судостроения. Проектирование судов. 1980. Вып. 23. С. 22–25.
6. Jacobs E.N., Ward K.E., Pinkerton R.M. The characteristics of 78 related airfoil sections from tests in the variable-density wind tunnel // NASA report. 1935. No. 460. P. 299–351.

References

1. Ship Theory. Reference book. In 3 vol. Under editorship of Ya. Voikunsky. Vol. 1. Hydromechanics. Ship resistance. Marine propulsors. Leningrad: Sudostroyeniye, 1985 (in Russian).
2. Bavin V., Zavadovsky N., Levkovsky Yu., Mishkevich V. Propellers. State-of-the-art calculation methods. Leningrad: Sudostroyeniye, 1983 (in Russian).
3. Artyushkov L., Achkinadze A., Rusetsky A. Ship propulsors. Text book. Leningrad: Sudostroyeniye, 1988 (in Russian).
4. Yelizarov A., Ilyinsky N., Potashev A. Inverse boundary problem of flow dynamics. Moscow: Fizmatlit VO Nauka, 1994 (in Russian).
5. Amromin E., Vasilyev A. On vortex-based calculation method for potential flow around flat foil // Voprosy sudostroyeniya. Proektirovaniye sudov (Shipbuilding matters. Ship design). 1980. Issue 23. P. 22–25 (in Russian).
6. Jacobs E.N., Ward K.E., Pinkerton R.M. The characteristics of 78 related airfoil sections from tests in the variable-density wind tunnel // NASA report. 1935. No. 460. P. 299–351.

Сведения об авторах

Яковлев Алексей Юрьевич, д.т.н., доцент, заместитель начальника отделения ходкости кораблей и судов – начальник отдела управления проектами ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, г. Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: 8 (812) 386-67-35. E-mail: 10_otd@ksrc.ru.

Орлов Олег Павлович, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник сектора ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: 8 (812) 415-45-26. E-mail: krylov@krylov.spb.ru

Ачкинадзе Александр Шамильевич, д.т.н., профессор кафедры «Теория корабля и строительная механика» ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». Адрес: 190008, Россия, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3. Тел.: 8 (812) 494-09-30. E-mail: achkin@mail.ru.

Бородай Игорь Кириллович, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: 8 (812) 415-49-88. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Родионов Александр Александрович, д.т.н., заведующий кафедрой «Теория корабля и строительная механика» ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». Адрес: 190008, Россия, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3. Тел.: 8 (812) 735-85-39. E-mail: rodionovsmk@yandex.ru.

About the authors

Alexey Yu. Yakovlev, Dr. Sci. (Eng.), Associated Professor, Deputy Head of Propulsion Division – Head of Project Management Department, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: 8 (812) 386-67-35. E-mail: 10_otd@ksrc.ru.

Oleg P. Orlov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: 8 (812) 415-45-26. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Aleksandr Sh. Achkinadze, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Ship Theory and Structural Mechanics Department, St. Petersburg State Marine Technical University, address: 3, Lotsmanskaya st., St. Petersburg, Russia, post code 190008, tel. 8 (812) 494-09-30. E-mail: achkin@mail.ru.

Igor K. Boroday, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: 8 (812) 415-49-88. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Alexandr A. Rodionov, Dr. Sci. (Eng.), Head of Ship Theory and Structural Mechanics Department, St. Petersburg State Marine Technical University. Address: 3, Lotsmanskaya st., St. Petersburg, Russia, post code 190008. Tel. 8 (812) 735-85-39. E-mail: rodionovsmk@yandex.ru.