

К ВОПРОСУ ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ПЕТЛЕВИДНЫХ ГРЕБНЫХ ВИНТОВ

А. В. Месропян, Ю. А. Шабельник

Уфимский университет науки и технологий,
Россия, 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12

Целью работы является поиск путей повышения характеристик водоходных движителей. Учитывая, что наиболее широко применяемым классом движителей являются гребные винты, рассматривается одна из возможных перспективных схем петлевидного гребного винта, позволяющая значительно улучшить гидродинамические, акустические, вибрационные и кавитационные характеристики винта. В работе используется численное моделирование, на основе которого рассчитаны кривые действия гребных винтов для выявления влияния геометрических параметров петлевидного гребного винта на его рабочий процесс. Проведено сравнение различных вариантов петлевидных гребных винтов и выявлено наиболее перспективное сочетание геометрических параметров. Задачи повышения эффективности гребных винтов решаются параметрической оптимизацией геометрии нетрадиционных схемных решений гребных винтов.

Ключевые слова: гребные винты, петлевидные винты, численное моделирование, кривые действия, перспективное судостроение.

Введение

Интенсивное развитие техники и новых технологий позволяет создавать современные суда, отвечающие возрастающим многоплановым требованиям экологичности и экономичности судов — одним из ключевых этапов развития судостроения является электрификация, способствующая устранению ряда проблем, связанных с использованием традиционных двигателей внутреннего сгорания. Конкурентоспособность судна на электродвижении обеспечивается комплексом технических параметров и характеристик, моделированием и исследованием работы пропульсивного комплекса судна, включающего собственно сам корпус, энергетические установки, движители, поскольку именно от согласования режимов их работы зависит гидродинамическое совершенство судна и его энергоэффективность. Эффективность применяемых движителей определяется типом и количеством движителей, обеспечением режима их работы в области высоких значений КПД, согласованностью режима работы движителя и мощности энергетической установки, т. е. обеспечением потребной мощности привода движителей от энергоустановки на разных режимах работы. Несогласованность режимов работы движителей и энергоустановки негативно сказывается на энергоэффективности судна в целом, кроме того, она может приводить к перегрузке и, как следствие, к перегреву и выходу из строя энергетической установки, либо — к неэффективной работе самого движителя, что может сопровождаться возникновением кавитационных явлений, приводящих к практически двукратному снижению тяги и к эрозии конструкционных материалов движителей. Поставленные задачи повышения эффективности рабочих процессов, совершенствования конструктивно-компоновочных и схемных решений пропульсивного комплекса определяют актуальность исследований и разработок в данной сфере.

Вместе с тем гребные винты (ГВ) — наиболее распространенный движитель судов. Интенсивное развитие технологий автоматизированного проектирования и производства гребных винтов в последние десятилетия способствовало доведению практически до совершенства формы профиля сечений и других геометрических параметров лопасти винта; дальнейшее улучшение конструкции традиционных гребных винтов уже не дает существенного повышения гидродинамических характеристик.

Можно утверждать, что профильные потери современных винтов сведены к минимальным значениям и дальнейшее повышение эффективности гребных винтов возможно в основном за счет уменьшения вихревых потоков, возникающих при его работе.

Анализ схемных решений [1] показывает: движители нетрадиционных схем при определенных условиях работы и надлежащем качестве расчета геометрических параметров не только не уступают, но и превосходят по своей эффективности традиционные, классические схемные решения гребных винтов.

Анализ научно-технической литературы показывает, что одним из перспективных решений является петлевидная форма лопастей ГВ (рис. 1), обладающая рядом преимуществ [1]. Петлевидная форма лопасти позволяет обеспечить, при определенных параметрах винта, снижение гидродинамических потерь, исключить концевые вихри, а две нагнетающие и две засасывающие поверхности лопасти способствуют увеличению создаваемого упора. Сочетание геометрических характеристик петлевидного винта приводит к улучшению качества рабочего процесса и эффективности гребного винта в целом.

Основываясь на результатах анализа научно-технической литературы [5–8] и патентных источников по петлевидным ГВ, было проведено исследование эффективности рабочего процесса петлевидного гребного винта.



Рис. 1. Петлевидные гребные винты:
а — гребной винт Shagrow [2, 3];
б — бionicский гребной винт [4]

Fig. 1. Loop propellers:

а — Shagrow propeller [2, 3]; б — Bionic propeller [4]

Постановка задачи

Лопасть петлевидного гребного винта представляет собой профиль, изогнутый в пространстве для образования петли. На эффективность гребного винта оказывает влияние большое количество факторов. В качестве ключевых можно выделить форму профиля лопасти и шаговое отношение [9, 10]. Рассмотрены следующие варианты геометрии при проводимом исследовании:

- шаговое отношение H/D изменяется в диапазоне значений 1...1,8;
- сегментный профиль, представляющий собой выпуклый профиль, максимальная толщина профиля располагается посередине хорды;
- аэродинамический профиль, максимальная толщина смещена к входной кромке лопасти;
- двусторонний сегментный профиль является симметричным двояковыпуклым профилем, максимальная толщина (e_m) которого расположена в середине хорды профиля (рис. 2г).

В качестве исходных данных прототипом для формирования размерного ряда петлевидных гребных винтов выбран типоразмер для двигателя мощностью 30 л. с., принято: диаметр винта $D = 240$ мм, относительный диаметр ступицы $d_0/D = 0,266$. Общий вид петлевидного гребного винта представлен на рис. 2.

Методы исследования. Анализ и сравнение характеристик представленных вариантов гребных винтов проводится с использованием кривых действия гребного винта, в виде зависимостей коэффициента упора (K_T) и коэффициента момента (K_Q) как функции относительной поступи гребного винта (λ_p), показывающих изменение эффективного упо-

ра и возникающего момента при изменении скорости (относительной поступи). Коэффициенты упора K_T и момента K_Q вычисляются по зависимостям [10]:

$$K_T = \frac{P}{\rho n^2 D^4}; K_Q = \frac{M}{\rho n^2 D^5},$$

где ρ — плотность воды; P — упор гребного винта; M — крутящий момент гребного винта.

Расчет значений коэффициентов K_T , K_Q позволяет определить КПД гребного винта, основной показатель его эффективности:

$$\eta_p = \frac{K_T \lambda_p}{K_Q 2\pi}.$$

Интегральные характеристики петлевидных гребных винтов получены на основе разработанных моделей и серии расчетов, проведенных в Ansys CFX [11, 12], зависимости кривых действия гребного винта и КПД как функций относительной поступи вычислены путем варьирования скорости набегающего потока. Работа гребного винта рассматривается в равномерном потоке, в квазистационарной постановке, при следующих условиях:

- используются стандартные атмосферные условия ($p = 101325$ Па, $T = 288,15$ К);
- плотность воды $0,999$ кг/м³;
- модель турбулентности $k-\epsilon$;
- скорость набегающего потока воды варьируется;
- скорость вращения гребного винта постоянна;
- моделирование границы взаимодействия гребного винта с водой задается интерфейсом Frozen Rotor;
- рабочим телом выступает двухфазный объем воды и водяного пара с изначальной объемной долей воды 100 % [12, 13];
- расчетная область цилиндрическая, в соответствии с рекомендациями [8, 9, 14] ее размеры, в зависимости от диаметра гребного винта, составляют $5D$ в высоту и $10D$ в длину.

Сеточная модель реализуется с использованием модуля Ansys Meshing, с измельчением сетки вдоль лопастей и втулки винта, а также формированием призматических слоев вдоль твердых стенок (рис. 3).

Сеточная модель на этапе формирования оценивается по основным критериям совершенства элементов сетки (Orthogonal Quality, Skewness, Aspect Ratio) и при анализе результатов моделирования

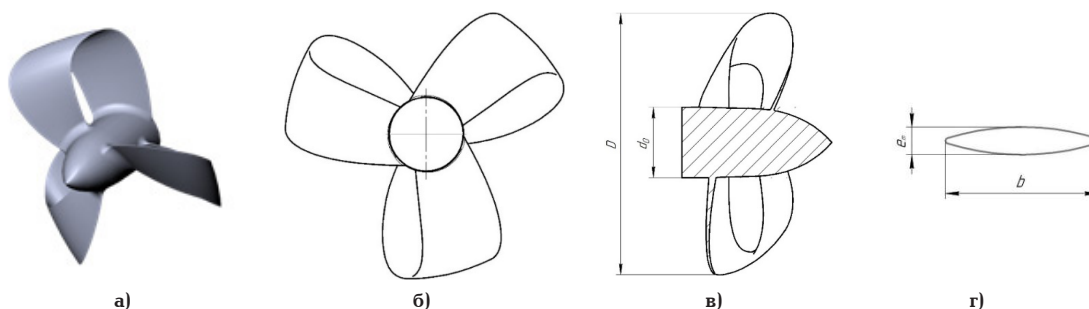


Рис. 2. Общий вид петлевидного гребного винта:
а) — изометрия; б) — вид спереди; в) — продольный разрез;
г) — профиль лопасти (двусторонний сегментный)

Fig. 2. General view of the loop-shaped propeller:

а) — isometry; б) — front view; в) — side section; г) — blade profile (double-sided segmented)

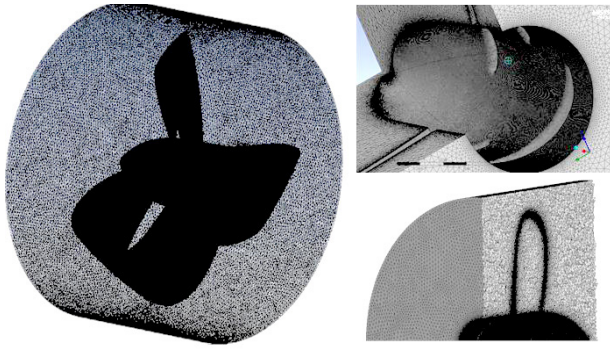


Рис. 3. Сеточная модель области вокруг гребного винта
Fig. 3. Grid model of the area around the propeller

по распределению пристеночного параметра Y_{plus} (y^+), описывающего в том числе используемую модель турбулентности.

Численное моделирование на основе конечно-элементного анализа в ANSYS CFX основано на использовании стандартных уравнений газовой динамики, описывающих механизмы переноса тепла, массы и количества движения, известных как уравнения Навье – Стокса, и численных методов решения дифференциальных уравнений, замыкаемых моделью турбулентности. k - ϵ модель турбулентности применяется для выполнения расчетов широкого круга задач; для описания турбулентных величин в ней используются системы двух нелинейных диффузионных уравнений — для массовой плотности

турбулентной энергии k и скорости ее диссипации ϵ [15]. В работах [16–19] выполнены исследования применения данной модели турбулентности. Для турбулентных течений при различных режимах течения описывают возможности ее адаптации для описания развитых турбулентных течений, возникающих вблизи контактных границ в результате развития гидродинамической неустойчивости.

Для анализа и сопоставления характеристик работы процесса используются следующие режимы работы ГВ:

— швартовый режим ($\lambda_p = 0$, $\eta_p = 0$ значение упора винта и его момента имеют максимальные значения);

— основной режим ($\lambda_p > 0$, КПД ГВ η_p находится в области максимальных значений);

— режим нулевого упора ($K_T = 0$, $\eta_p = 0$).

Полученные таким образом кривые действия $K_T = f(\lambda_p)$, $K_Q = f(\lambda_p)$, $\eta_p = f(\lambda_p)$ для серии петлевидных ГВ разной геометрии позволяют выявить влияние геометрических параметров на рабочий процесс ГВ, определить сочетание геометрических параметров, позволяющих обеспечить достижение высокой энергоэффективности.

Обсуждение результатов

Результаты моделирования представлены на рис. 4 и 5 в виде зависимостей влияния шагового отношения на гидродинамические характеристики для каждого из рассматриваемых типов профиля гребного винта. На рис. 4 приведены кривые действия и КПД гребного винта с сегментным профи-

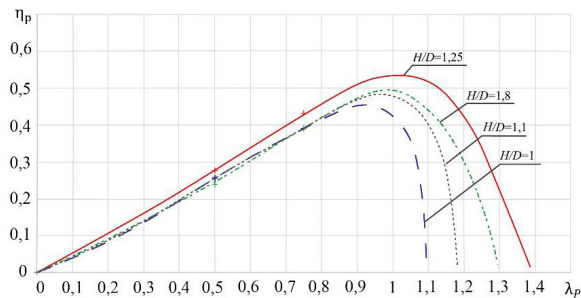
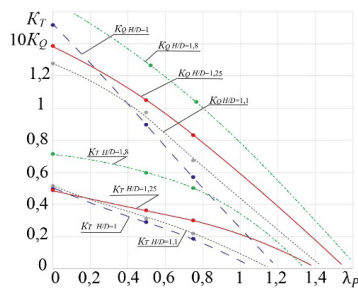


Рис. 4. Кривые действия и КПД гребных винтов с сегментным профилем:
— $H/D = 1$; — $H/D = 1,1$; — — — $H/D = 1,25$; — $H/D = 1,8$
Fig. 4. Action curves and propeller efficiency with segment profile:
— $H/D = 1$; — $H/D = 1,1$; — — — $H/D = 1,25$; — $H/D = 1,8$

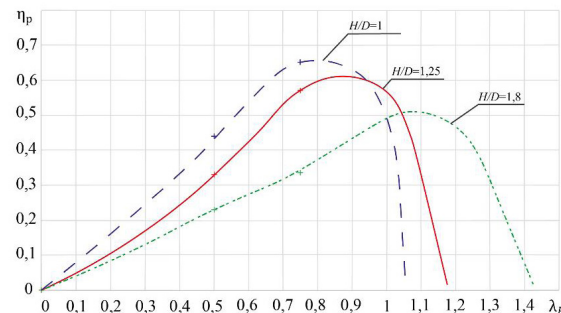
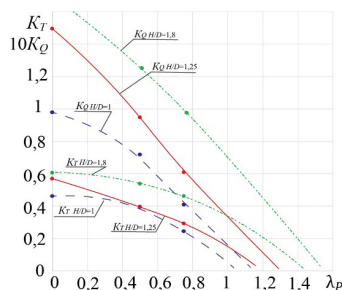


Рис. 5. Кривые действия и КПД гребных винтов с двусторонним сегментным профилем:
— $H/D = 1$; — $H/D = 1,1$; — — — $H/D = 1,25$; — $H/D = 1,8$
Fig. 5. Action curves and propeller efficiency with double-sided segment profile:
— $H/D = 1$; — $H/D = 1,1$; — — — $H/D = 1,25$; — $H/D = 1,8$

лем при различном шаговом отношении (H/D). Винт с большим шаговым отношением ($H/D=1,8$) имеет высокие тяговые характеристики, но КПД при этом ниже варианта с шагом $H/D=1,25$.

Моделирование рабочего процесса ГВ выполняется в характерных точках, что позволяет выявить характер зависимостей и рассчитать максимально возможный КПД. Таким образом, при $H/D=1,25$ $\eta_{\max}=54\%$ при $\lambda_p=1,02$, в то время как при $H/D=1$ $\eta_{\max}=47\%$ при $\lambda_p=0,97$. При различных режимах работы ГВ разброс КПД варьируется в широких пределах, так при низких скоростях $\lambda_p=0,5$, разница в КПД для разных шаговых отношений составляет 3%, а при $\lambda_p=1$ разница в КПД достигает 12%, что обусловлено падением тяговых характеристик для винтов с меньшим шаговым отношением.

Установлено, что петлевидный гребной винт с сегментным профилем, переменной шириной хорды (относительное максимальное значение (h/R) которой составляет 0,33), с шаговым отношением $H/D=1,25$ при рассмотренных условиях имеет наиболее высокий КПД по сравнению с аналогичными петлевидными винтами с другими значениями шага винта.

Расчетные зависимости кривых действия и КПД гребного винта с двусторонним сегментным профилем при различном шаговом отношении H/D приведены на рис. 5. Аналогично винтам с сегментным профилем винт с большим шаговым отношением ($H/D=1,8$) имеет высокие тяговые характеристики, но более низкие значения КПД. Максимальный КПД гребного винта с шаговым отношением $H/D=1$ составляет 65% при $\lambda_p=0,75$, что выше других рассмотренных вариантов с двусторонним сегментным профилем на 5–15%.

Сопоставляя полученные характеристики гребных винтов с разным профилем при одинаковых шаговых отношениях, выявлено, что КПД винтов с двусторонним сегментным профилем во всех случаях выше (на 2–9%), кроме того, симметричный профиль является предпочтительным с точки зрения кавитации.

Исследование влияния ширины хорды профиля на характеристики петлевидного винта в целом показало, что более узкая передняя часть лопасти негативно сказывается на характере обтекания профилей лопасти, как и постоянная хорда по длине лопасти, что связано с особенностями распределения полей давления. Проведенный анализ позволил установить, что благоприятное течение потока обеспечивается геометрией лопасти с переменной по длине лопасти хордой, максимальная ширина хорды достигается на высоте наружного диаметра.

Результаты моделирования рабочего процесса петлевидного гребного винта с четырьмя лопастями показали, что увеличение количества лопастей повышает создаваемый упор, но не приводит к повышению КПД во всем диапазоне режимов работы.

Расчет петлевидных гребных винтов с аэродинамическим профилем лопасти выявил сходство с другими вариантами винтов протекания рабочего процесса, однако использование аэродинамического профиля не позволило достичь наиболее высоких значений КПД.

Вывод

Проведенные исследования и серия расчетов, выполненная для различных вариантов характер-

ных геометрических параметров петлевидного ГВ, показывают, что параметрическая оптимизация геометрии ГВ позволяет обеспечить повышение КПД до уровня $\eta_{\max}=0,65$, превосходящего классические, традиционные схемные решения ГВ, у которых КПД $\eta \leq 0,45$, с одновременным увеличением тяговых характеристик винта. Следует также отметить, что обеспечение указанных характеристик петлевидного гребного винта неразрывно связано с обеспечением согласованного режима работы всего пропульсивного комплекса судна. Данные задачи предопределяют необходимость выполнения дополнительных расчетов и исследований кавитационных явлений и акустического шума, возникающих при работе гребных винтов. Решение описанных задач обеспечит применение более совершенных и энергоэффективных схемных решений водоходных двигателей в перспективных судах.

Список источников

1. Месропян А. В., Шабельник Ю. А. О способах повышения эффективности водоходных двигателей. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021. Vol. 48 (3). P. 39–51. DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-3-39-51.
2. Sharrow G. C., Cherry H. Propeller. US patent 009926058B2; filed May 27th, 2017; published September 21st, 2017.
3. Sharrow Engineering Propeller. URL: <https://boatstest.com/Sharrow-Engineering-Propeller/> (дата обращения: 20.02.2023).
4. Schärfer Florian. Bionic propeller: nature inspiring innovation. URL: <https://bigrep.com/posts/bionic-propeller-nature-inspiring-innovation/> (дата обращения: 20.02.2023).
5. Тогунац А. Р., Вишневецкий Л. И. Гидродинамические аспекты работы соосных гребных винтов противоположного вращения с электрической передачей мощности // Морской вестник. 2018. № 3 (67). С. 83–86.
6. Kang J. G., Kim M. C., Kim H. U. [et al.]. Study on Propulsion Performance by Varying Rake Distribution at the Propeller Tip // Journal of Marine Science and Engineering. 2019. Vol. 7 (11). 386. 12 p. DOI: 10.3390/jmse7110386.
7. Oloan A., Baidowi A. Open Water and Performance Analysis of Marine Propeller with PBCF Based CFD Method // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 972 (1). 012050. DOI: 10.1088/1755-1315/972/1/012050.
8. Shouman M., Helal M. Influence of Marine Propeller Geometry on Turbulence Model Selection for CFD Simulations // Marine Technology Society Journal. 2021. Vol. 55 (2). P. 150–164. DOI: 10.4031/MTSJ.55.2.14.
9. Stan L. C., Calimanescu I., Popa V. New Innovative Backflow Marine Propeller Optimization Study by CFD // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 400, Issue 8. P. 2–10. DOI: 10.1088/1757-899X/400/8/082018.
10. Carlton J. S. Marine Propellers and Propulsion. 2010. 4 ed. 585 p.
11. ANSYS CFX Reference Guide. Release 2020 R2. ANSYS, Inc. July 2020.
12. ANSYS FLUENT 14.0 Theory Guide. Release 2020 R2. ANSYS, Inc. July 2020.
13. Trejo I., Terceno M., Valle J. [et al.]. Analysis of a ship propeller using CFD codes // International Conference on computational methods in marine engineering. 2007. 8 p.
14. Корнелюк О. Н. Способы задания граничных условий и геометрии гребного винта в Flow Vision // Наука та прогресс транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. 2018. № 5 (77). С. 74–80.
15. Авраменко М. И. О к-ε модели турбулентности. Снежинск: Изд-во РФЯЦ – ВНИИТФ, 2-е изд., перераб. и дополн. 2010. 102 с.

16. Старченко А. В., Нутерман Р. Б., Данилкин Е. А. Численное моделирование турбулентных течений и переноса примеси в уличных каньонах: моногр. Томск: Изд-во Томского ун-та, 2015. 252 с. DOI: 10/17223/9785751123963.

17. Панов Д. О., Смирнов Е. М., Таранов А. Е. [и др.]. Моделирование ламинарно-турбулентного перехода в задаче численного определения кривых действия гребного винта // Труды Крыловского государственного научного центра. 2013. Вып. 78 (362). С. 29–42.

18. Shih T.-H., Liou W. W., Shabbir A. [et al.]. A new $k-\epsilon$ eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows — Model development and validation // Computers fluids. 1995. No. 24 (3). P. 227–238.

19. Коркодинов Я. А. Обзор семейства $k-\epsilon$ моделей для моделирования турбулентности // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2013. Т. 15, № 2. С. 5–16.

МЕСРОПЯН Арсен Владимирович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Механика и цифровое проектирова-

ние» Уфимского университета науки и технологий (УУНиТ), г. Уфа.

SPIN-код: 7250-9161

AuthorID (РИНЦ): 17417

AuthorID (SCOPUS) 26638367100

Адрес для переписки: avm_74@mail.ru

ШАБЕЛЬНИК Юлия Андреевна, старший преподаватель кафедры «Механика и цифровое проектирование», факультета авиационных двигателей и энергетических установок УУНиТ, г. Уфа.

SPIN-код: 3995-9042

AuthorID (РИНЦ): 525619

Адрес для переписки: sammy@list.ru

Для цитирования

Месропян А. В., Шабельник Ю. А. К вопросу об эффективности рабочего процесса петлевидных гребных винтов // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2023. Т. 7, № 2. С. 15–21. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-2-15-21.

Статья поступила в редакцию 14.04.2023 г.

© А. В. Месропян, Ю. А. Шабельник

THE QUESTION OF THE EFFICIENCY OF THE WORKFLOW OF LOOP PROPELLERS

A. V. Mesropyan, Yu. A. Shabelnik

Ufa University of Science and Technology,
Russia, Ufa, K. Marks st., 12, 450008

The purpose of the work is to find ways to improve the characteristics of water propellers. Taking into account that propellers are the most widely used, considered one of the possible promising schemes - a loop-shaped propeller, which makes it possible to significantly improve the hydrodynamic, acoustic, vibration and cavitation characteristics of the propeller. The work uses numerical simulation, on the basis of which the propeller action curves are calculated to identify the influence of geometric parameters of the loop propeller on its working process. A comparison of various variants of loop propellers is carried out, identified the most perspective combination of geometric parameters. The requirements for the propulsors of perspective ships set the task of increasing the efficiency of propellers, which are solved by parametric optimization of the geometry of non-traditional schematic solutions of propellers.

Keywords: propellers, loop propellers, numerical simulation, propeller action curves, perspective ships.

References

- Mesropyan A. V., Shabelnik Yu. A. O sposobakh povysheniya effektivnosti vodokhodnykh dvizhiteley [On ways to improve the efficiency of water propellers] // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki. *Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences*. 2021. Vol. 48 (3). P. 39–51. DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-3-39-51. (In Russ.)
- Sharrow G. C., Cherry H. Propeller. US patent 009926058B2; filed May 27th, 2017; published September 21st, 2017. (In Engl.)
- Sharrow Engineering Propeller. URL: <https://boattest.com/Sharrow-Engineering-Propeller/> (accessed: 20.02.2023). (In Engl.)
- Schärfer Florian. Bionic propeller: nature inspiring innovation. URL:// <https://bigrep.com/posts/bionic-propeller-nature-inspiring-innovation/> (accessed: 20.02.2023). (In Engl.)
- Togunyats A. R., Vishnevskiy L. I. Gidrodinamicheskiye aspekty raboty soosnykh grebnykh vintov protivopolozhnogo predstavleniya s obnaruzheniyem peredachi moshchnosti [Hydrodynamic aspects of the operation of coaxial propellers of the opposite representation with the detection of power transfer] // Morskoy vestnik. *Sea Herald*. 2018. No. 3 (67). P. 83–86. (In Russ.)
- Kang J. G., Kim M. C., Kim H. U. [et al.]. Study on Propulsion Performance by Varying Rake Distribution at the Propeller Tip // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2019. Vol. 7 (11). 386. 12 p. DOI: 10.3390/jmse7110386. (In Engl.)
- Oloan A., Baidowi A. Open Water and Performance Analysis of Marine Propeller with PBCF Based CFD Method // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 972 (1). 012050. DOI: 10.1088/1755-1315/972/1/012050. (In Engl.)
- Shouman M., Helal M. Influence of Marine Propeller Geometry on Turbulence Model Selection for CFD Simulations // *Marine Technology Society Journal*. 2021. Vol. 55 (2). P. 150–164. DOI: 10.4031/MTSJ.55.2.14. (In Engl.)
- Stan L. C., Calimanesu I., Popa V. New Innovative Backflow Marine Propeller Optimization Study by CFD // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 400, Issue 8. P. 2–10. DOI: 10.1088/1757-899X/400/8/082018. (In Engl.)
- Carlton J. S. *Marine Propellers and Propulsion*. 2010. 4th ed. 585 p. (In Engl.)
- ANSYS CFX Reference Guide. Release 2020 R2. ANSYS, Inc. July 2020. (In Engl.)
- ANSYS FLUENT 14.0 Theory Guide. Release 2020 R2. ANSYS, Inc. July 2020. (In Engl.)
- Trejo I., Terceno M., Valle J. [et al.]. Analysis of a ship propeller using CFD codes // *International Conference on computational methods in marine engineering*. 2007. 8 p. (In Engl.)
- Kornelyuk O. N. Sposoby zadaniya granichnykh usloviy i geometrii grebnogo vinta v Flow Vision [Methods for specifying boundary conditions and propeller geometry in Flow Vision. Science and progress in transport] // *Nauka ta progress transportu. Visnik Dnipropetrovs'kogo natsional'nogo universitetu zaliznichnogo transportu. Science and Progress of Transport. Bulletin of Dnipropetrovs'k National University of Railway Transport*. 2018. No. 5 (77). P. 74–80. (In Russ.)
- Avramenko M. I. O k-ε model' turbulentsnosti [On the k-ε model of turbulence]. 2nd ed., revised. and additional. Snezhinsk, 2010. 102 p. (In Russ.)
- Starchenko A. V., Nuterman R. B., Danilkin E. A. Chislennoye modelirovaniye turbulentsnykh techeniy i perenosa primesi v ulichnykh kan'onakh. [Numerical modeling of turbulent flows and admixture transport in street canyons]. Tomsk, 2015. 252 p. DOI: 10/17223/9785751123963. (In Russ.)
- Panov D. O., Smirnov E. M., Taranov A. E. [et al.]. Modelirovaniye laminarno-turbulentnogo perekhoda v zadache chislennogo opredeleniye krivy deystviya grebnogo vinta. [Simulation of a laminar-turbulent transition in the problem of numerical determination of the propeller action curve] // *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra. Proceedings of the Krylov State Research Center*. 2013. Issue 78 (362). P. 29–42. (In Russ.)
- Shih T.-H., Liou W. W., Shabbir A. [et al.]. A new k-ε eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows — Model development and validation // *Computers fluids*. 1995. No. 24 (3). P. 227–238. (In Engl.)
- Korkodinov Ya. A. Obzor semeystva k-ε modeley dlya modelirovaniya turbulentsnosti. [Overview of the family of k-ε models for modeling turbulence] // *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroyeniye, materialovedeniye. Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanical Engineering, Materials Science*. 2013. Vol. 15, no. 2. P. 5–16. (In Russ.)

MESROPYAN Arsen Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Mechanics and Digital Design Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa.

SPIN-code: 7250-9161

AuthorID (RSCI): 17417

AuthorID (SCOPUS) 26638367100

Correspondence address: avm_74@mail.ru

SHABELNIK Julia Andreevna, Senior Lecturer of Mechanics and Digital Design Department, Faculty of Aircraft Engines and Power Plants, Ufa University of Science and Technology, Ufa.

SPIN-code: 3995-9042

AuthorID (RSCI): 525619

Correspondence address: cammy@list.ru

For citations

Mesropyan A. V., Shabelnik Yu. A. The question of the efficiency of the workflow of loop propellers // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2023. Vol. 7, no. 2. P. 15–21. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-2-15-21.

Received April 14, 2023.

© A. V. Mesropyan, Yu. A. Shabelnik