

УДК 629.5.035.5  
EDN: RCCGTU

А.Р. Филатов<sup>1</sup> , А.М. Шевелев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д.Ф. Устинова», Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург», Россия

## СРАВНЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛОПАСТНОГО И ПЕТЛЕВОГО ГРЕБНЫХ ВИНТОВ

**Объект и цель научной работы.** Объектами исследования являются судовые гребные винты (ГВ). Цель работы состоит в сопоставлении гидродинамических характеристик (ГДХ) лопастного и аналогичного ему петлевого ГВ в однородном потоке.

**Материалы и методы.** Нахождение ГДХ ГВ осуществлялось посредством численного моделирования динамики вязкой жидкости методом контрольных объемов. Решение стационарных уравнений Рейнольдса выполнялось с помощью полуэмпирической модели турбулентности  $k-\omega$  SST в низкорейнольдсовой постановке в сочетании с моделью ламинарно-турбулентного перехода.

**Основные результаты.** Показано, что расчетный КПД петлевого ГВ на рабочих поступях выше, чем у лопастного, а разница между их максимальными значениями достигает 1,6 %. Рассмотрен вопрос о влиянии кавитации на петлевой ГВ.

**Заключение.** Разработанный петлевой ГВ по сравнению с лопастным имеет как больший КПД, так и больший упор, что говорит о возможной экономии при его использовании. Помимо этого, петлевой ГВ менее подвержен образованию кавитации.

**Ключевые слова:** петлевой гребной винт, лопастной гребной винт, численное моделирование, гидродинамические характеристики.

*Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.*

UDC 629.5.035.5  
EDN: RCCGTU

A.R. Filatov<sup>1</sup> , A.M. Shevelev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Baltic State Technical University “Voenmeh” named after D.F. Ustinov, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> St. Petersburg State Polytechnical University, St. Petersburg, Russia

## COMPARISON OF HYDRODYNAMIC PERFORMANCE OF BLADED AND LOOP PROPELLERS

**Object and purpose of research.** This paper discusses marine propellers. Its purpose is to compare hydrodynamic performance of conventional propeller and an equivalent toroidal propeller in uniform flow.

**Materials and methods.** Hydrodynamic characteristics of propeller were obtained through numerical simulation of viscous fluid as per FVM method. Steady Reynolds equations were solved as per semi-empirical turbulence model  $k-\omega$  SST in low-Reynolds formulation, combined with the model of laminary-turbulent transition (LTT).

**Main results.** It is shown that design efficiency of toroidal propeller at operational advance ratios is higher than for the conventional one, and the difference between their peak values is as high as 1.6 %. Cavitation effects for toroidal propellers have also been discussed.

**Conclusion.** Toroidal propeller suggested by the authors offers both higher efficiency and higher thrust than conventional propellers so it could probably be more cost-efficient in operation. Besides, toroidal propeller is less prone to cavitation inception.

**Keywords:** toroidal propeller, conventional propeller, numerical simulation, hydrodynamic performance.

*The authors declare no conflicts of interest.*

*Для цитирования:* Филатов А.Р., Шевелев А.М. Сравнение гидродинамических характеристик лопастного и петлевого гребных винтов. Труды Крыловского государственного научного центра. 2024; 3(409): 66–70.

*For citations:* Filatov A.R., Shevelev A.M. Comparison of hydrodynamic performance of bladed and loop propellers. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2024; 3(409): 66–70 (in Russian).

## Введение

### Introduction

Гребные винты (ГВ) являются наиболее распространенным типом движителей за счет развиваемого упора, компактности и легкости. В судостроении задачи повышения КПД пропульсивного комплекса и снижение его шума всегда актуальны, поскольку от их решения зависят как экономическая эффективность судна, так и комфорт эксплуатации.

Можно утверждать, что достигнут предел КПД лопастных ГВ [1, 2], так что даже применение параметрической оптимизации и оптимизации формы не дают его существенного увеличения [3].

Одним из путей решения проблемы повышения КПД ГВ представляется изменение топологии лопастей, а именно – применение петлевых ГВ. С середины 2000-х гг. предпринимались попытки математически описать и спроектировать петлевой ГВ для судов [1, 4, 5]. Коммерчески успешных результатов добилась компания Sharrow Marine, которая в 2017 г. представила свой петлевой ГВ [6, 7]. Анализ результатов работы петлевых ГВ этой фирмы позволяет сделать вывод о перспективности применения лопастей петлевой формы для пассажирских судов.

Целью настоящей работы является сопоставление ГДХ лопастного и аналогичного ему петлевого ГВ.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- определение кривых действия традиционного лопастного ГВ в свободной воде;
- разработка петлевого ГВ с сохранением числа и диаметра лопастей, а также диаметра ступицы;
- определение кривых действия разработанного петлевого ГВ в свободной воде.

## Материалы и методы

### Materials and methods

В качестве исходного был выбран четырехлопастной гребной винт пассажирского судна, внешний вид которого показан на рис. 1, а основные параметры приведены в табл. 1.

Первым шагом в разработке петлевого ГВ стало создание 3D-модели петлевой лопасти, ограниченной диаметром ступицы и наружным диаметром лопастного ГВ. На втором шаге разработки петлевого ГВ с помощью сопряженного решателя (Adjoint Solver) выполнялась оптимизация формы петлевой лопасти в программе Ansys Fluent с целью увеличения КПД. Разработанный указанным спосо-

бом петлевой ГВ показан на рис. 2, а его параметры приведены в табл. 1.

Для нахождения ГДХ лопастного и разработанного петлевого ГВ также использовался пакет вычислительной гидродинамики Ansys Fluent.

Задачи решались в стационарной постановке с дискретизацией по пространству 2-го порядка. С учетом периодичности течения использовалась расчетная область, включающая в себя только одну лопасть ГВ. Использована модель турбулентности  $k-\omega$  SST [8] совместно с моделью ламинарно-турбулентного перехода Ментера – Лэнгтри [9]. В расчетах принята плотность воды  $\rho = 998,2 \text{ кг/м}^3$ , динамическая вязкость  $\mu = 1,003 \text{ Па/с}$ .

На входной границе расчетной области была задана скорость потока, отношение турбулентной

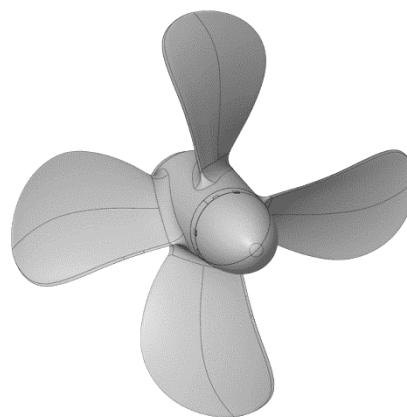


Рис. 1. 3D-модель четырехлопастного гребного винта пассажирского судна

Fig. 1. 3D model of four-bladed conventional propeller for passenger vessel

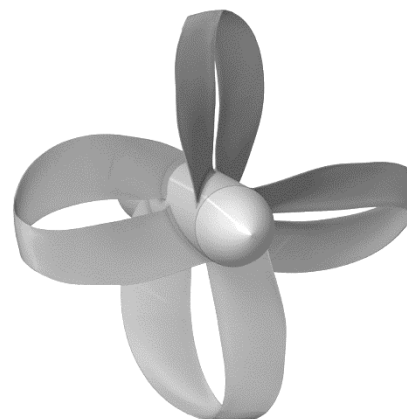


Рис. 2. 3D-модель петлевого гребного винта

Fig. 2. 3D model of toroidal propeller

**Таблица 1.** Основные параметры гребного винта

**Table 1.** Main parameters of the propeller

	Лопастной	Петлевой
Диаметр $D$ , мм	900	900
Число лопастей $Z$	4	4
Средний шаг, мм	978	1600
Дисковое отношение $A_e/A_0$	0,53	0,57

вязкости и степень турбулентности. Последние две величины во всех расчетах имели одно и то же значение для корректного сравнения КПД лопастного и петлевого ГВ [10, 11]. На выходной границе назначалось условие свободного вытекания или статическое давление для нахождения зон возможной кавитации. На остальных внешних границах ставилось условие свободного проскальзывания, а на поверхностях ГВ – условие прилипания.

Для всех расчетов использовалась полиэдрическая сетка (рис. 3). Размерность задач нахождения ГДХ ГВ в среднем была равна 5 млн ячеек. В численной модели лопастного и петлевого ГВ при нахождении ГДХ для полного разрешения пограничного слоя [12] высота первых пристеночных ячеек принята равной соответственно  $2,5 \cdot 10^{-6}$  м и  $1,2 \cdot 10^{-6}$  м с 40 слоями в призматической области и коэффициентом роста 1,15. ГДХ ГВ сравнивались при одинаковом числе оборотов.

## Результаты и обсуждение

### Results and discussion

Расчетные и аналитические ГДХ лопастного ГВ показаны на рис. 4 (см. вклейку). Коэффициент

упора  $K_T$ , коэффициент момента  $K_Q$ , КПД  $\eta$  и  $J$  определяются по формулам:

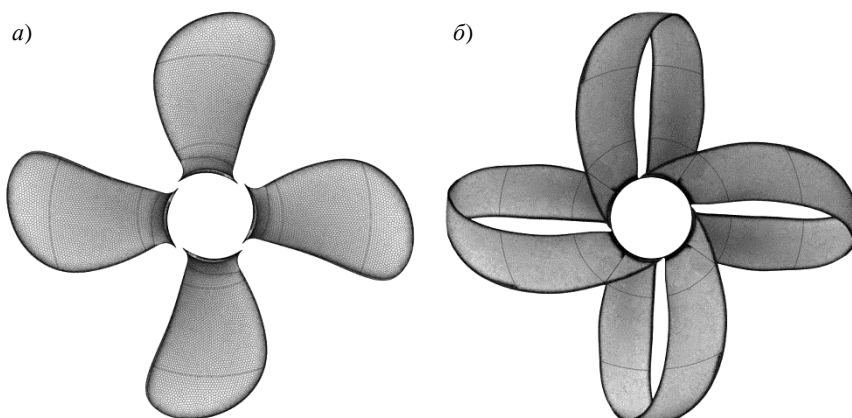
$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}, \quad K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}, \quad \eta = \frac{T}{Q} \frac{v}{2\pi n}, \quad J = \frac{v}{nD}, \quad (1)$$

где  $T$  – упор ГВ;  $Q$  – крутящий момент на ГВ;  $v$  – скорость потока на входе в расчетную область;  $\rho$  – плотность воды;  $n$  – частота вращения ГВ.

Поскольку разница между аналитическим и численным расчетами лопастного ГВ (рис. 5, см. вклейку) не превосходит 5% на рабочих поступях, в т.ч. в зоне максимального КПД при относительной поступи  $J = 0,97$ , полученные результаты можно считать сходящимися. С ростом относительной поступи  $J$  погрешность расчетов увеличивается в связи с уменьшением упора и момента ГВ. Относительные разницы  $\delta K_T$ ,  $\delta K_Q$  и  $\delta \eta$  определяются по формулам:

$$\delta K_T = \frac{|K_T - K_T^*|}{K_T^*}, \quad \delta K_Q = \frac{|K_Q - K_Q^*|}{K_Q^*}, \quad \delta \eta = \frac{|\eta - \eta^*|}{\eta^*}, \quad (2)$$

где  $K_T$ ,  $K_Q$ ,  $\eta$  – значения, полученные в результате численного моделирования;  $K_T^*$ ,  $K_Q^*$ ,  $\eta^*$  – значения, полученные в результате аналитического расчета.



**Рис. 3.** Поверхностная сетка в задачах расчета лопастного (а) и петлевого (б) гребных винтов

**Fig. 3.** Surface mesh in calculation of propellers: a) conventional; b) toroidal

На рис. 6 (см. вклейку) показаны численные ГДХ петлевого и лопастного ГВ. Максимальный КПД петлевого ГВ достигает 72,3 % при  $J=1,3$ , а максимальный КПД лопастного ГВ достигает 70,7 %.

На рис. 7 (см. вклейку) показаны распределения безразмерной координаты  $y^+$ , которая в расчетах ГДХ не превосходила 1, а на рис. 8 (см. вклейку) – распределение коэффициента давления по поверхностям лопастного и петлевого ГВ.

На рис. 9 (см. вклейку) показана выполненная с помощью  $q$ -критерия и раскрашенная амплитудой скорости визуализация вихревых структур, сходящих с лопастного и петлевого ГВ при условии равенства их упоров и  $q$ -критерия.

На рис. 10 (см. вклейку) показаны области возможной кавитации на засасывающих поверхностях лопастей ГВ при режиме работы на максимальном КПД и числе кавитации  $\sigma = 0,5$ . Зеленым цветом обозначены поверхности, на которых давление меньше давления насыщенных паров воды при температуре 15 °С. Скорость вращения лопастного ГВ составляла 850 об/мин, скорость вращения петлевого ГВ выбрана равной 687 об/мин исходя из условия равенства упоров обоих ГВ. Число кавитации  $\sigma$  определяется по следующей формуле:

$$\sigma = \frac{P - P_v}{(\rho/2)v^2},$$

где  $p$  – давление в месте расположения ГВ;  $p_v$  – давление насыщенных паров воды.

Sharrow Marine провела ходовые испытания судна как с традиционным лопастным ГВ, так и с петлевым, разработанным этой компанией. Кавитационные картины ГВ [13] сравнивались при одинаковой скорости судна и одинаковых диаметрах ГВ (рис. 11). Видно, что петлевой ГВ менее подвержен образованию кавитации, при этом принципиальное отличие картин заключается в отсутствии у петлевого ГВ концевых вихрей.

## Заключение

### Conclusion

Разработанный петлевой ГВ по сравнению с лопастным имеет и более высокий КПД, и больший упор, что говорит о возможной экономии при его использовании. Помимо этого, петлевой ГВ менее подвержен образованию кавитации. В последующих работах авторы рассмотрят проблему обеспечения прочности петлевого ГВ за счет как усиления слабых мест, так и подбора материалов. Отдельным важным вопросом является разработка технологии изготовления петлевых ГВ.

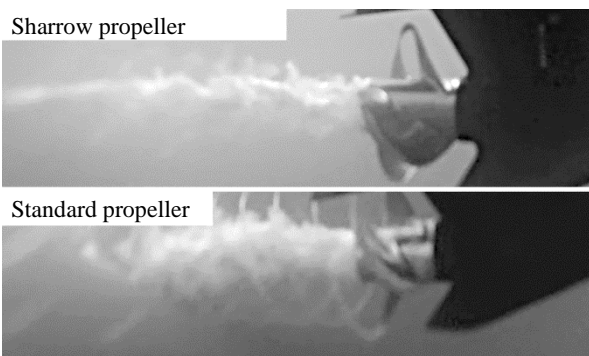


Рис. 11. Картины кавитации лопастного и петлевого гребных винтов

Fig. 11. Cavitation patterns of conventional and toroidal propeller

## Список использованной литературы

1. 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.
2. Месропян А.В., Шабельник Ю.А. О способах повышения эффективности водоходных движителей // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021. Вып. 48, № 3. С. 39–51. DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-3-39-51.
3. Лаврищева Л.С., Новоселов В.Н. Оптимизация формы модели гребного винта в однородном потоке // Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. Спец. вып. 1. С. 75–83. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-1-S-I-75-83.
4. Богатырев М.Д. Совершенствование конструкции гребного винта на судах лесосплавного флота : дис. ... канд. тех. наук. Йошкар-Ола : ПГТУ, 2006. 156 с.
5. Куликова Е.А. Исследование эффективности петлевых гребных винтов с помощью программного комплекса flow simulation // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2021. № 4. С. 41–44.
6. Propeller : patent 9926058 United States / Sharrow G.C., Cherry H. № 15/605764; appl. 27.05.2017; publ. 21.09.2017. 66 p.
7. Sharrow Engineering Propeller // BoatTEST : [site]. [S. l.], 2019. URL: <https://boatstest.com/Sharrow-Engineering-Propeller/> (Accessed: 01.03.2024).
8. Menter F.R. Two equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA Journal. 1994. Vol. 32. P. 1598–1605. DOI: 10.2514/3.12149.
9. Correlation-based transition model using local variables. Part 1: Model Formulation / F.R. Menter, R.B. Langtry, S.R. Likki [et al.] // Journal of Turbo-

- machinery. 2006. Vol. 128, № 3. P. 413–422. DOI: 10.1115/1.2184352.
10. Таранов А.Е., Лобачев М.П. Определение гидродинамических характеристик моделей гребных винтов с учетом ламинарно-турбулентного перехода // Труды Крыловского государственного научного центра. 2015. Вып. 90(374). С. 47–54.
  11. Моделирование ламинарно-турбулентного перехода в задаче численного определения кривых действия гребного винта / Д.О. Панов, Е.М. Смирнов, А.Е. Таранов, М.П. Лобачев // Труды Крыловского государственного научного центра. 2013. Вып. 78(362). С. 29–42.
  12. CFD application for an icebreaker propeller design / A.E. Taranov, M.P. Lobachev, T.I. Saifullin, I.G. Frolova // Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Symposium on Marine Propulsors (SMP'17). Espoo, 2017. Vol. 2. P. 398–403.
  13. Sharrow propeller™ vs Standard stainless cavitation / Sharrow Marine // YouTube : [site]. 2019. 11 Oct. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=X7pJqFgzXp4/> (Accessed: 01.03.2024).
  9. Correlation-based transition model using local variables. Part 1: Model Formulation / F.R. Menter, R.B. Langtry, S.R. Likki [et al.] // Journal of Turbomachinery. 2006. Vol. 128, No. 3. P. 413–422. DOI: 10.1115/1.2184352.
  10. Taranov A.E., Lobachev M.P. Hydrodynamic calculation of propeller model taking laminary-turbulent transition into account // Transactions of Krylov State Research Centre. 2015. Vol. 90(374). P. 47–54 (in Russian).
  11. Simulation of laminar-turbulent transition in numerical determination of propeller performance curves / D.O. Panov, E.M. Smirnov, A.E. Taranov, M.P. Lobachev // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2013. Vol. 78(362). P. 29–42 (in Russian).
  12. CFD application for an icebreaker propeller design / A.E. Taranov, M.P. Lobachev, T.I. Saifullin, I.G. Frolova // Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Symposium on Marine Propulsors (SMP'17). Espoo, 2017. Vol. 2. P. 398–403.
  13. Sharrow propeller™ vs Standard stainless cavitation / Sharrow Marine // YouTube : [site]. 2019. 11 Oct. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=X7pJqFgzXp4/> (Accessed: 01.03.2024).

## References

1. Mesropyan A.V., Shabelnik Yu.A. Efficiency of toroidal propellers // Scientific Bulletin of Omsk State University. Series “Aerospace and Power Engineering”. 2023. Vol. 7, No. 2. P. 15–21. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-2-15-21 (in Russian).
2. Mesropyan A.V., Shabelnik Yu.A. On efficiency improvement of marine propellers // Herald of Dagestan State Technical University. Natural Sciences. 2021. Vol. 48(3). P. 39–51. DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-3-39-51 (in Russian).
3. Lavrisheva L.S., Novoselov V.N. Shape optimization of propeller model in uniform flow // Transactions of Krylov State Research Centre. 2018. Special Issue No. 1. P. 75–83. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-1-S-I-75-83 (in Russian).
4. Bogatyrev M.D. Propeller design improvement for timber-rafting fleet : Cand. Sci. thesis / Volga State University of Technology. Yoshkar-Ola, 2006. 156 p. (in Russian).
5. Kulikova Ye.A. Efficiency assessment of toroidal propellers in Flow Simulation software package // Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dalnego Vostoka (Research Challenges in Transport of Siberia and Russian Far East). 2021. Vol. 4. P. 41–44 (in Russian).
6. Propeller : patent 9926058 United States / Sharrow G.C., Cherry H. № 15/605764; appl. 27.05.2017; publ. 21.09.2017. 66 p.
7. Sharrow Engineering Propeller // BoatTEST : [site]. [S. l.], 2019. URL: <https://boatstest.com/Sharrow-Engineering-Propeller/> (Accessed: 01.03.2024).
8. Menter F.R. Two equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA Journal. 1994. Vol. 32. P. 1598–1605. DOI: 10.2514/3.12149.

---

## Сведения об авторах

Филатов Антон Романович, к.т.н., доцент кафедры высшей математики ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д.Ф. Устинова». Адрес: 190005, Россия, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д. 1. E-mail: [filatov\\_ar@voenmeh.ru](mailto:filatov_ar@voenmeh.ru). <https://orcid.org/0000-0001-7352-3003>.

Шевелев Антон Михайлович, студент бакалавриата Института машиностроения, материалов и транспорта ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого». Адрес: 195251, Россия, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29. E-mail: [shevelev.am@edu.spbstu.ru](mailto:shevelev.am@edu.spbstu.ru).

## About the authors

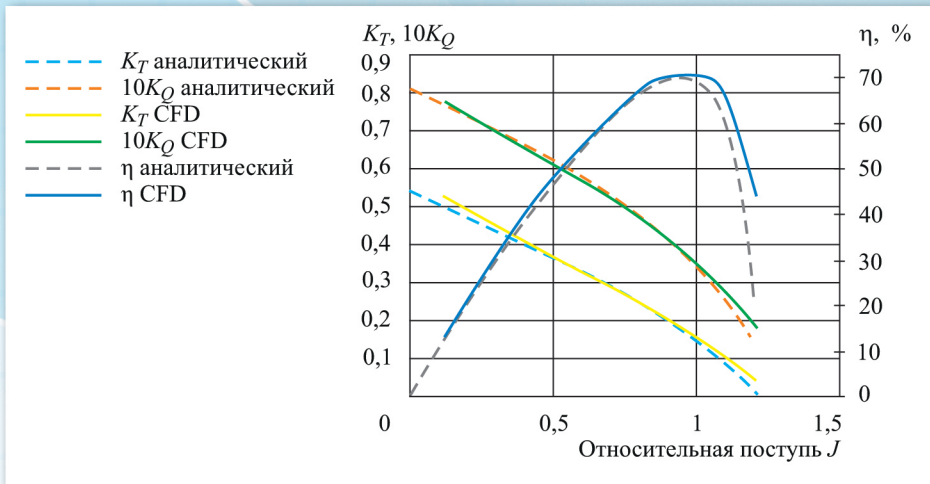
Anton R. Filatov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Higher Mathematics, Baltic State Technical University “Voennmeh”, named after D.F. Ustinov. Address: 1, 1<sup>st</sup> Krasnoarmeyskaya st., St. Petersburg, Russia, post code 190005. E-mail: [filatov\\_ar@voenmeh.ru](mailto:filatov_ar@voenmeh.ru). <https://orcid.org/0000-0001-7352-3003>.

Anton M. Shevelev, Undergraduate Student, Institute of Machinery, Materials and Transport of Peter the Great St. Petersburg State Polytechnical University. Address: 29, Politekhnikeskaya st., St. Petersburg, Russia, post code 195251. E-mail: [shevelev.am@edu.spbstu.ru](mailto:shevelev.am@edu.spbstu.ru).

Поступила / Received: 04.04.24  
Принята в печать / Accepted: 22.08.24  
© Филатов А.Р., Шевелев А.М., 2024

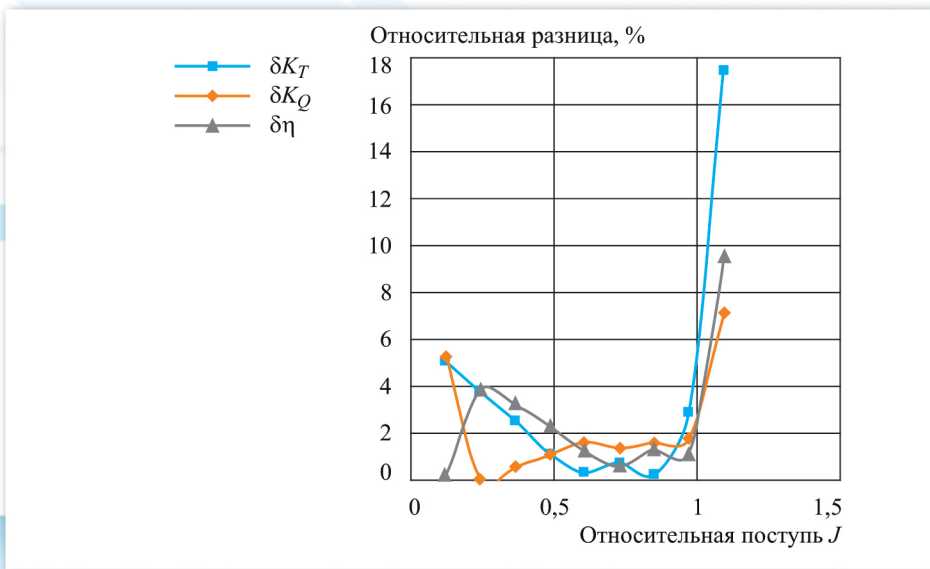
**Рис. 4.** Аналитические и расчетные гидродинамические характеристики лопастного гребного винта

**Fig. 4.** Analytical and calculated hydrodynamic parameters of conventional propeller



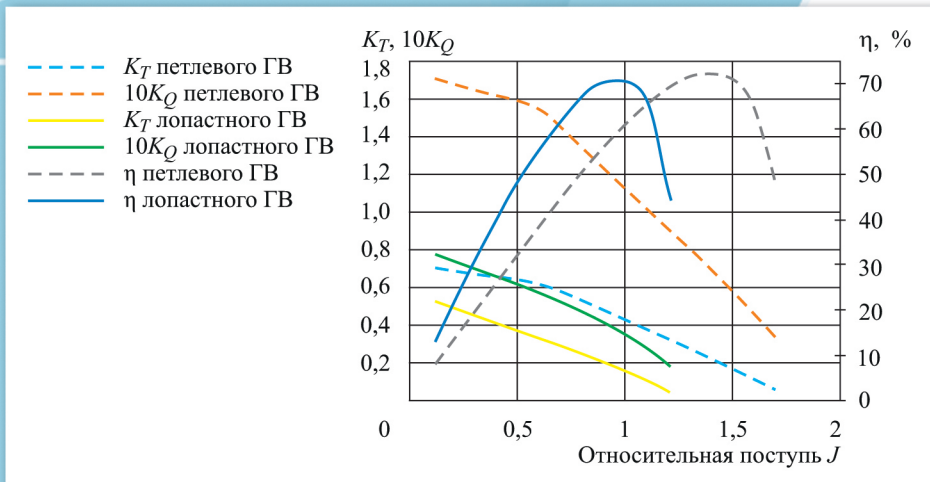
**Рис. 5.** Погрешность численных гидродинамических характеристик лопастного гребного винта

**Fig. 5.** Error in numerical hydrodynamic parameters of conventional propeller

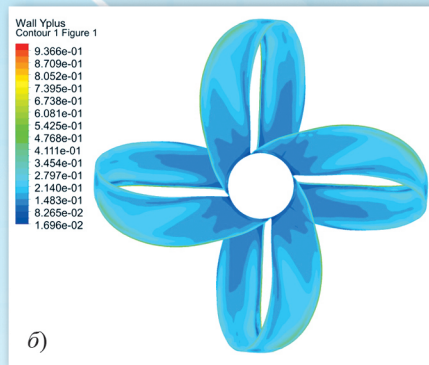
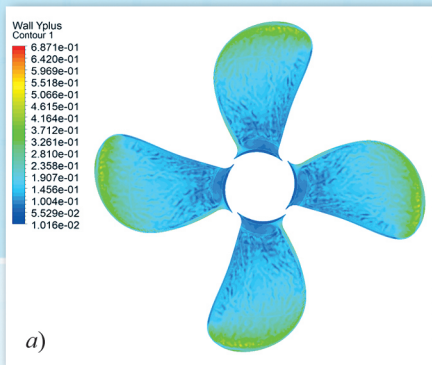


**Рис. 6.** Расчетные гидродинамические характеристики петлевого и лопастного гребных винтов

**Fig. 6.** Calculated hydrodynamic parameters of conventional and toroidal propeller

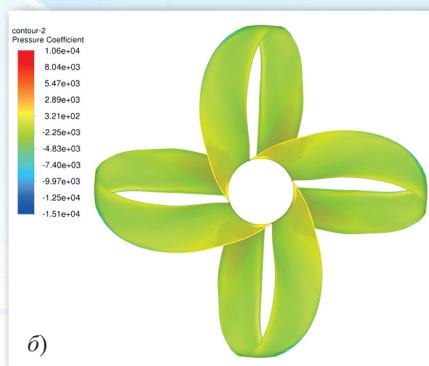
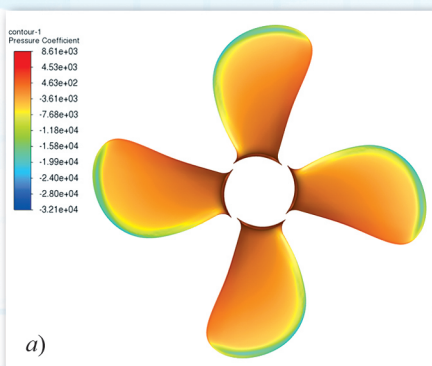






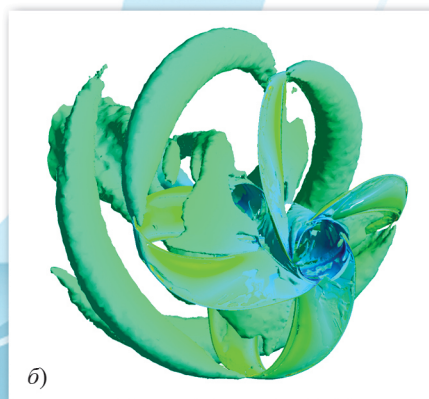
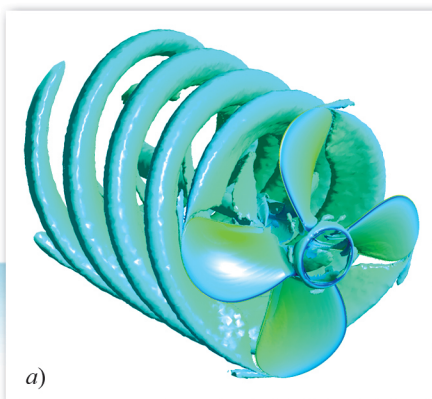
**Рис. 7.** Безразмерная координата  $y^+$  на поверхности лопастного (а) и петлевого (б) гребных винтов

**Fig. 7.** Non-dimensional coordinate  $y^+$  on the surface of conventional (a) and toroidal (b) propeller



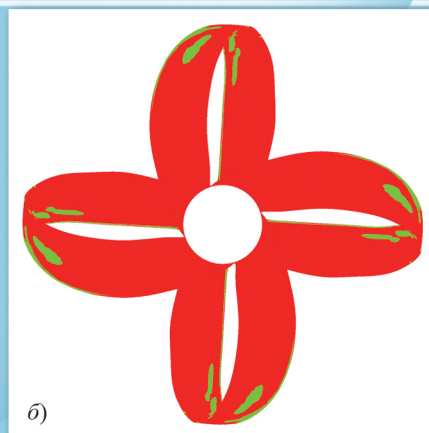
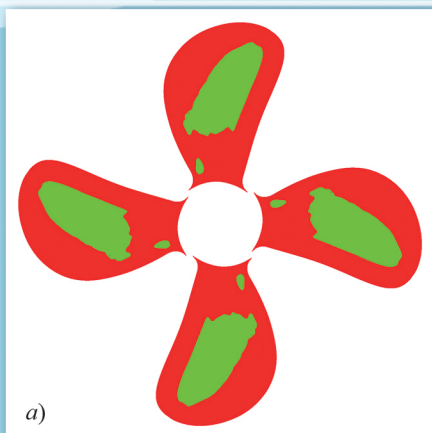
**Рис. 8.** Коэффициент давления на поверхности лопастного (а) и петлевого (б) гребных винтов

**Fig. 8.** Pressure coefficient on the surface of conventional (a) and toroidal (b) propeller



**Рис. 9.** Вихревые структуры, сходящие с лопастного (а) и петлевого (б) гребных винтов

**Fig. 9.** Vortex shedding from conventional (a) and toroidal (b) propeller



**Рис. 10.** Области возможной кавитации лопастного (а) и петлевого (б) гребных винтов

**Fig. 10.** Possible cavitation areas on conventional (a) and toroidal (b) propeller