

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГРЕБНЫХ ВИНТОВ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ

А. В. Месропян, Ю. А. Шабельник

Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Россия, 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1

В статье рассматриваются особенности рабочих процессов петлевидных гребных винтов в сравнении с классическими (традиционными) гребными винтами. Численное моделирование с использованием метода конечных элементов применяется для получения интегральных характеристик основных параметров и построения кривых действия гребных винтов для анализа эффективности работы различных типов гребных винтов на разных режимах работы. Проведено сравнение классических и петлевидных гребных винтов; сопоставительный анализ показал повышение эффективности, улучшение кавитационных характеристик петлевидных гребных винтов в широком диапазоне режимов работы.

Ключевые слова: гребные винты, петлевидные винты, тороидальные винты, численное моделирование, кривые действия, кавитация гребных винтов, перспективное судостроение.

Для цитирования: Месропян А. В., Шабельник Ю. А. Анализ эффективности гребных винтов различных схем на основе численного моделирования рабочих процессов // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2025. Т. 9, № 4. С. 5–12. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-4-5-12. EDN: DSWPCX.



Месропян А. В., Шабельник Ю. А., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

STUDY OF THE EFFICIENCY OF VARIOUS DESIGNS PROPELLERS BASED ON NUMERICAL MODELING OF WORKING PROCESSES

A. V. Mesropyan, Yu. A. Shabelnik

Ufa State Petroleum Technological University, Russia, Ufa, Kosmonavtov St., 1, 450064

The article examines the characteristics of looped propellers compared to conventional (traditional) propellers. Numerical modeling is used to obtain integral characteristics of the main parameters and construct propeller performance curves to analyze the performance of various propeller types under various operating conditions. A comparison of conventional and looped propellers is conducted, and the comparative analysis demonstrates increased efficiency and improved cavitation performance of looped propellers across a wide range of operating conditions.

Keywords: propellers, looped propellers, toroidal propellers, numerical modeling, action curves, cavitation of propellers, advanced shipbuilding.

For citation: Mesropyan A. V., Shabelnik Yu. A. Study of the efficiency of various designs propellers based on numerical modeling of working processes. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2025. Vol. 9, no. 4. P. 5–12. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-4-5-12. EDN: DSWPCX.



© Mesropyan A. V., Shabelnik Yu. A., 2025.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.



Рис. 1. Разработка высокоэффективных двигателей
Fig. 1. Development of highly efficient propulsion systems



Рис. 2. Анализ рынка маломерных судов
Fig. 2. Boat market analysis

Введение

Актуальность разработки высокоэффективных водоходных двигателей обуславливается необходимостью достижения закладываемых при разработке характеристик перспективных судов различного назначения. Современные суда должны соответствовать высоким требованиям экологичности и экономичности. Помимо снижения расхода топлива стоят задачи по улучшению маневренных характеристик; обеспечению остойчивости судна, что, соответственно, требует совершенствования пропульсивного комплекса «Корпус — Энергетическая установка — Двигатель» [1]; разработке высокоэффективных двигателей. Разработка двигателей, обеспечивающих высокие значения КПД и низкий удельный расход топлива в широком диапазоне рабочих режимов является задачей, требующей выбора методик проектирования, оптимизации геометрических параметров, определения технологии производства и методов обработки. В настоящее время повышение эффективности двигателя — это многоаспектная, комплексная задача, связанная с поиском решения поставленных задач и разработкой новых схемных решений (рис. 1).

Исследования рынка маломерных судов [2], обзор существующих схемно-компоновочных решений позволили сформировать статистические

данные по используемым двигателям маломерных судов (рис. 2). Помимо традиционных катеров, яхт и спортивных лодок, к ним же относятся гидроциклы, аэроглиссеры и парусные суда. Отдельные категории (весельные и парусные суда) в классификации не приводятся, поскольку данные двигатели не относятся к двигателям. Статистические данные позволяют говорить о преобладающем применении гребных винтов (ГВ) в качестве двигателей маломерных судов.

Стоит отметить, ГВ обладает ограничениями по возможным скоростям хода судна. Для достижения высоких скоростей (более 80 км/ч) целесообразно использовать комбинированные схемы. В этой области находят применение двигатели с воздушными винтами.

Исследования эффективности двигателей [3] показывают, что максимальный КПД гребных винтов может достигать 65 %; водометные двигатели обеспечивают значения КПД до 50 %; КПД суперкавитирующих гребных винтов достигает 55 %; воздушные винты с ростом скоростей позволяют достигнуть значений КПД в 55 %. Однако не только значения КПД определяют выбор двигателя; важно назначение судна, выход на расчетные скорости движения и другие факторы. Следовательно, наиболее эффективным двигателем маломерного судна в настоящее время является гребной винт. Тем не менее современные классические ГВ уже доведены до совершенства. Методики проектирования, способы обработки и получения качества поверхностей не позволяют производить дальнейшее значительное повышение эффективности рабочих процессов ГВ. В связи с этим разработка нестандартных, новых схемных решений ГВ является актуальной задачей.

Разработка новых схемных решений гребных винтов отражена в работах [4–9], исследования направлены на анализ и поиск путей повышения эффективности винтовых двигателей. Авторами рассматриваются соосные ГВ и двухступенчатые лопастные двигатели, используемые, как правило, на траулерах, а также освещены вопросы модельных испытаний. Исследования соосных ГВ ведутся с 1960-х гг. В этой области достигнуты значительные результаты в вопросах проектирования и моделирования рабочих процессов, однако подобная конструкция значительно усложняет общее схемно-компоновочное решение.

Одним из способов повышения эффективности рабочего процесса ГВ является снижение профильных потерь путем воздействия на пограничный слой. Для этих целей используются и соосные винты, позволяющие оптимизировать поле скоростей перед винтом, обеспечивая плавное, равномерное обтекание лопастей. Исследования в области воздействия на пограничный слой, отраженные в работах [6, 7], позволили спроектировать ГВ с отверстиями и с лопастями, выполненными в виде волнистой поверхности, но стоит отметить значительное усложнение изготовления таких ГВ. Выполненный обзор и анализ конструктивно-компоновочных схемных решений позволили выявить перспективные направления развития гребных винтов, в частности, нетрадиционные схемные решения, такие как гребные винты с петлевидными лопастями (рис. 3).

На основе проведенных исследований [10], в которых изложен анализ влияния таких параметров, как шаг ГВ, относительная толщина лопастей, форма профиля лопасти, количество лопастей, ав-



Рис. 3. Петлевидные гребные винты:
а — гребной винт Sharrow [12];
б — петлевидный гребной винт [11]

Fig. 3. Loop-shaped propellers:
a — Sharrow propeller [12]; б — loop-shaped propeller [11]

торами выявлены оптимальные соотношения геометрических параметров петлевидного гребного винта (ПГВ), позволяющие обеспечить достижение высоких значений КПД. На данное схемное решение получен патент РФ [11], подтверждающий инновационность разрабатываемого ГВ. Рассматривается трехлопастной ГВ с петлевидными лопастями, с двусторонним симметричным профилем и шаговым отношением $H/D=1$.

Современные исследования в области петлевидных лопаточных машин [13, 14] отмечают снижение шума при обтекании потоком подобных конструкция за счет разделения потока и взаимодействия между пульсационными компонентами скорости. Исследования воздушных тороидальных винтов свидетельствуют о повышении эффективности охлаждения [15] и снижении аэродинамического шума при тех же условиях моделирования [16]. В статьях отмечается повышение тяговых характе-

ристик при заданных мощностях и перспективность дальнейших исследований данного направления.

В статье рассматривается сравнительный анализ эффективности разрабатываемого схемного решения с петлевидными лопастями и классических (штатных) схемных решений гребных винтов. Анализ научно-технической литературы показывает значительный рост публикаций по теме исследования лопастей петлевидной формы воздушных винтов [16] и гребных винтов [17], в которых рассматриваются рабочие процессы и вопросы повышения эффективности движителей путем применения нетрадиционных схемных решений.

Постановка задачи

Рассматриваются гребные винты, предназначенные для энергетической установки мощностью 22 кВт (30 л. с.), с наружным диаметром $D = 240$ мм. Классический гребной винт, согласно теоретическому чертежу [18] с шаговым отношением $H/D=1$, относительным диаметром ступицы $d_0/D = 0,266$ и петлевидный гребной винт с аналогичными значениями относительного диаметра ступицы и шагового отношения представлены на рис. 4. Значение мощности энергетической установки обусловлено широким распространением подобных двигателей на рынке маломерных судов и возможностью последующей экспериментальной верификации поставленной задачи.

Методы исследования

Сравнительная оценка эффективности рассматриваемых гребных винтов выполняется по расчетным значениям коэффициентов упора (K_p) и момента (K_Q) для различных режимов работы (в зависимости от относительной поступи λ_p). Таким образом, целью исследования является получение кривых действия при прочих равных условиях.

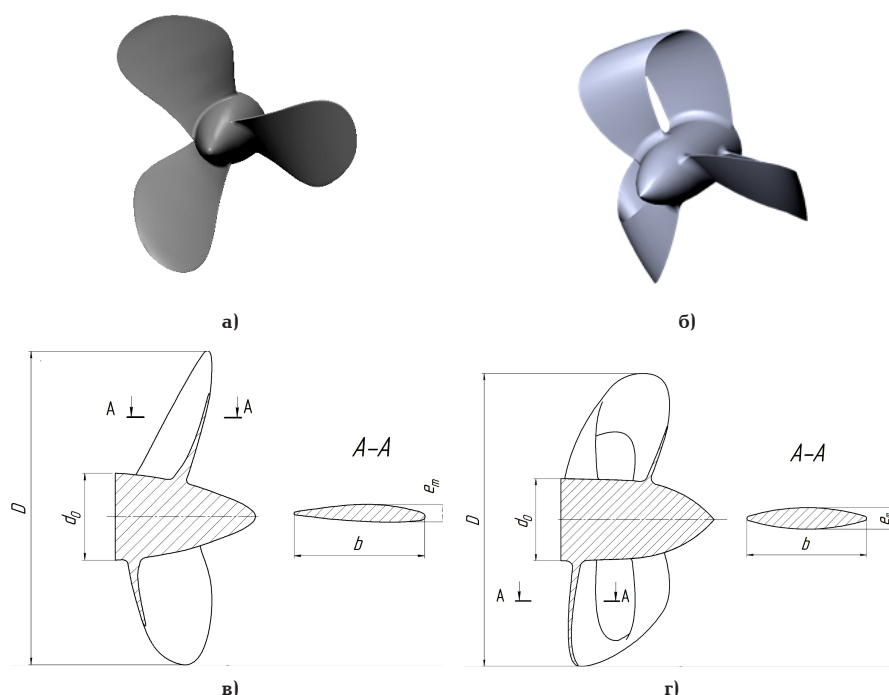


Рис. 4. Общий вид: а — изометрия классический ГВ; б — изометрия ПГВ;
в — продольный разрез классический ГВ; г — продольный разрез ПГВ

Fig. 4. General view: а — isometry of the classic propeller;
б — isometry of the loop-shaped propeller; в — longitudinal section of the propeller;
г — longitudinal section of the loop-shaped propeller

Кривые действия ГВ позволяют оценить работоспособность винта, наглядно продемонстрировать эффективность различных вариантов ГВ в определенных условиях.

Коэффициенты упора K_T и момента K_Q вычисляются по зависимостям [19]:

$$K_T = \frac{P}{\rho n^2 D^4}; \quad K_Q = \frac{M}{\rho n^2 D^5}, \quad (1)$$

где ρ — плотность воды; n — частота вращения; 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:

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

Численное моделирование с использованием метода конечных элементов [20] направлено на получение интегральных характеристик основных параметров и построение кривых действия ГВ. Численное моделирование является универсальным инструментом, позволяющим качественно и количественно описывать сложные гидродинамические процессы. Численные модели обеспечивают низкую погрешность гидродинамических характеристик при корректной постановке задачи, хорошей сеточной модели и выборе начальных условий и моделей турбулентности. Рабочий процесс гребного винта рассматривается в равномерном потоке, в квазистационарной постановке и при стандартных атмосферных условиях.

В качестве исходных данных для моделирования используются параметры расчетной модели, приведенные в табл. 1.

Отметим, что в вопросах моделирования кавитации не существует универсальной модели, позволяющей описать процесс кавитации от зарождения до схлопывания пузырька. Все современные численные модели кавитации являются гомогенными и с высокой степенью точности позволяют спрогнозировать кавитационные явления на этапе прогнозирования. Модель Шнерра—Зауэра требует значительных вычислительных мощностей. Модель ZGB (Zwart—Gerber—Belarmi) не всегда точно дает значения начала кавитации. Модель Рэлея—Плессета позволяет моделировать образование и схлопывание кавитационных каверн, анализировать вихревые структуры в кавитационном потоке, но предполагает постоянство давления на расстоянии от пузырька.

Для моделирования кавитации используется модель Рэлея—Плессета, рабочим телом при этом является вода в жидком и парообразном состоянии, в начальной постановке распределенная в соотношении 1:0.

При моделировании приняты следующие допущения:

- скорость потока является варьируемой величиной при выполнении серии расчетов;
- Шнерра—Зауэра частота вращения ($n = \text{const}$) задается постоянной в соответствии с номинальной мощностью двигателя;
- моделирование границы взаимодействия гребного винта с водой задается интерфейсом Frozen Rotor [21];

Таблица 1. Исходные данные
Table 1. Initial data

Параметр	Значения
Внешние условия	$p = 101325 \text{ Па}$, $T = 288,15 \text{ К}$
Плотность воды	$0,997 \text{ кг/м}^3$
Модель турбулентности	<i>SST</i>
Скорость набегающего потока	$0 \dots 15 \text{ м/с}$
Частота вращения вала ГВ	3000 об/мин
Рабочее тело	двухфазный объем воды и водяного пара с изначальной объемной долей воды 100 %
Расчетная область	цилиндрическая область с размерами $5D$ в высоту и $10D$ в длину

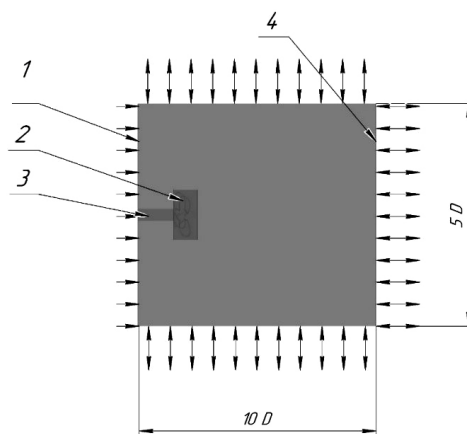


Рис. 5. Расчетная схема: 1 — входное сечение; 2 — гребной винт; 3 — вал; 4 — выходное сечение
Fig. 5. Calculation scheme: 1 — inlet section; 2 — propeller; 3 — shaft; 4 — outlet section

— расчет кавитации выполняется в два этапа: на предварительном этапе кавитация не учитывается, далее выполняется основной расчет, использующий в качестве начальных условий полученные результаты.

Границы расчетной области при обтекании тел сложной формы оказывают влияние на погрешность (достоверность) расчетов рабочего процесса. В связи с этим для тел с развитой вихревой структурой определяются границы на значительном удалении, в зависимости от характерных размеров исследуемого объекта (в данном случае диаметра гребного винта). Излишне большая область увеличивает расчетное время и требует больших вычислительных мощностей, следовательно, выполняется предварительное исследование располагаемой ресурсоемкости и постановки задачи. На рис. 5 представлена расчетная схема. Границы расчетной области приняты в соответствии с рекомендациями [22].

Сеточные модели сформированы с учетом рекомендаций [23]: с измельчением сетки вдоль лопастей и втулки винта, а также формированием призматических слоев вдоль твердых стенок (рис. 6). Для всех моделей количество элементов вращающегося домена составляет порядка 40 млн с выполнением условий качества сеточных моделей: ортогональное качество (Orthogonal Quality) — приемлемыми считаются значения ниже 0,15; скошенность (Skewness) — допускаются значения ниже 0,95; соотно-

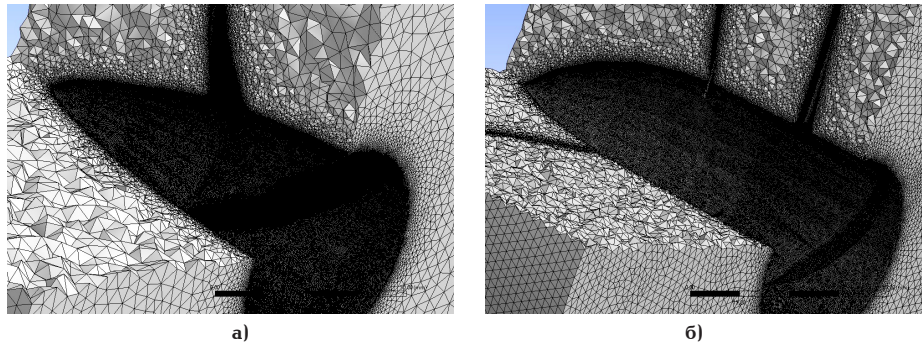


Рис. 6. Сеточная модель ГВ: а — классический; б — петлевидный
 Fig. 6. Grid model propellers: a — classic; б — loop-shaped

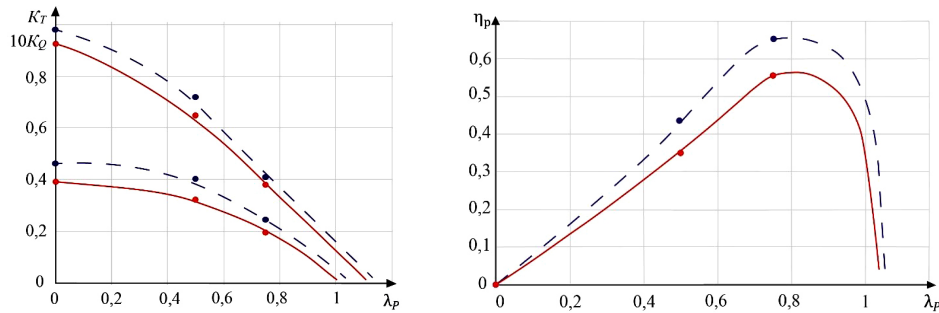


Рис. 7. Кривые действия и КПД:
 — петлевидный ГВ; — классический ГВ
 Fig. 7. Efficiency curves:
 — loop-shaped propeller; — classic propeller

шения сторон (Aspect Ratio) — близки к единице. Общая расчетная область выполнена с измельчением сетки вокруг области вращающегося домена, а также с формированием призматических слоев вдоль моделируемого вала гребного винта. Результаты моделирования рассматривались по параметру Y^+ с целью оценки применимости выбранной модели турбулентности. Данный параметр определяет, насколько корректно разрешен пограничный слой. В работе используется модель турбулентности SST, что повышает требования качества сетки для обеспечения значений параметра $Y^+ < 2$.

Результаты исследования

Результаты представлены на рис. 7 в виде кривых действия $K_T = f(\lambda_p)$, $K_Q = f(\lambda_p)$, позволяющих оценить рабочие процессы гребных винтов на различных режимах.

Результаты моделирования показывают, что разница в тяговых характеристиках классического и петлевидного ГВ на различных режимах работы существенна и составляет от 5 до 25 % в пользу петлевидного, а разница моментов при этом составляет от 0 до 10 %. График зависимости КПД от режима работы ГВ свидетельствует о заметном преимуществе петлевидного винта. Его эффективность выше — от 0 до 10 % в зависимости от значения относительной поступи. Наибольшая разница в тяговых значениях наблюдается на швартовых режимах. Максимальные значения КПД достигаются на расчетном (номинальном) режиме работы винта. Проведенный анализ указывает на большую энергоэффективность разрабатываемого схемного решения винта с петлевидными лопастями.

Графическое представление доли газообразной части представлено с использованием Q -критерия

(Q -criterion), являющегося квадратичной формой инвариантов тензоров завихренности и скоростей деформации.

Q -критерий является одним из наиболее известных подходов к идентификации вихрей, основанных на локальном анализе поля скоростей в областях с ненулевыми значениями нормы тензора завихренности Ω . Помимо этого, ненулевые значения в рассматриваемой области течения может иметь и норма тензора сдвиговых деформаций S .

$$Q = \frac{1}{2} (|\Omega|^2 - |S|^2), \quad (3)$$

где S — тензор скоростей деформаций; Ω — тензор вращения.

Вихрь определяется как область течения, в которой норма тензора завихренности превышает норму тензора скоростей деформаций (область течения, в которой выполняется неравенство $Q > 0$). Визуализация значений Q -критерия близких к нулю (например, $Q=0,001$) усложняет построение изоповерхности, делает ее излишне плотной. Выбор слишком большого значения (например, $Q=0,03$) приводит к разреженной визуализации. Стоит учитывать общий объем газообразной фракции, для которой выполняется построение, — малые доли фракций при больших значениях Q -критерия не могут быть визуализированы.

Сравнительных анализ гребных винтов выполняется при прочих равных условиях. Для визуализации возникающей кавитации выполнено построение изоповерхностей доли газообразной фракции для вращающегося домена классического и петлевидного гребных винтов с значением $Q=0,01$ (рис. 8).

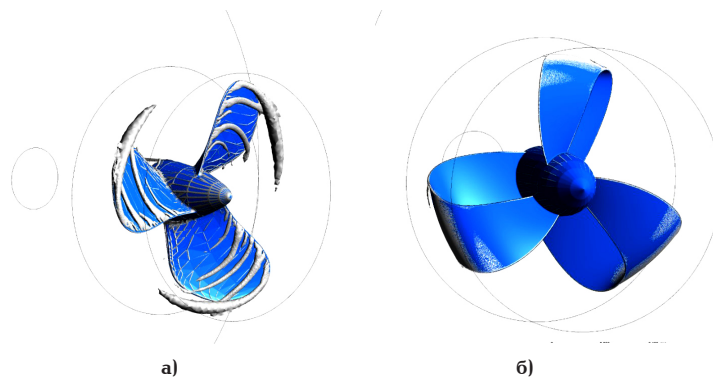


Рис. 8. Моделирование вихреобразования ГВ:
а — классического; б — петлевидного
Fig. 8. Modeling of propeller vortex formation:
a — classic; б — loop-shaped

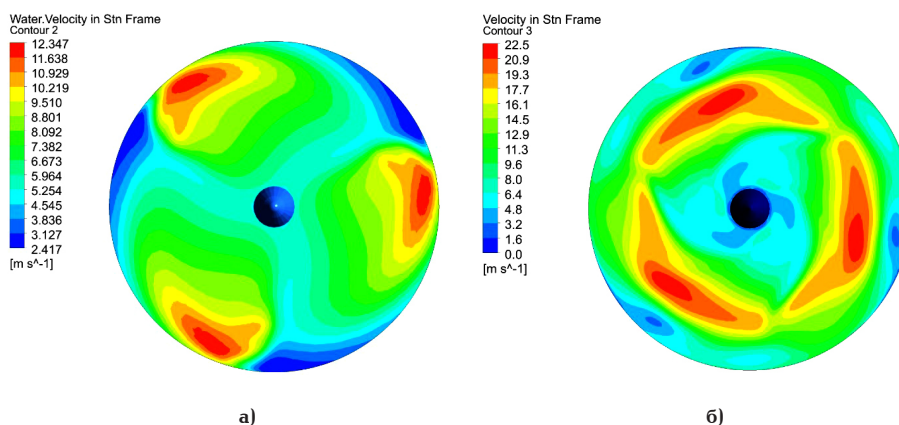


Рис. 9. Поле скоростей в сечении за ГВ:
а — классического; б — петлевидного
Fig. 9. Velocity field in the section behind the propeller:
a — classic; б — loop-shaped

Распределение изоповерхностей наглядно демонстрирует образование концевых вихря у стандартного винта и незначительные области вихревых течений у винта с петлевидными лопастями. Полученное распределение доли газообразной фракции подтверждает первоначальное утверждение о снижении кавитационных явлений.

Скорость потока при заданных условиях за гребным винтом петлевидной формы достигает значений $v = 22,5$ м/с, что на 45 % выше скоростей классического ГВ. Поле скоростей в сечении в большей степени носит равномерный характер (рис. 9), что способствует повышению качества рабочего процесса за счет однородности потока и, соответственно, достижению более высокой эффективности рабочего процесса гребного винта — расчетные значения КПД петлевидного ГВ превышают значения КПД классического ГВ в рассматриваемом диапазоне работы от 0 до 10 %.

Преимущества петлевидного гребного винта перед классическим, выявленные в ходе моделирования рабочего процесса, позволяют сделать вывод о целесообразности использования выбранного сочетания геометрических параметров винта (с симметричным двусторонним сегментным профилем и шагом $H/D = 1$) для дальнейшей оптимизации петлевидных винтов других движителей, построения закономерностей и их использования в проектор-

Заключение

Проведенные исследования и серия расчетов, выполненные для двух типов ГВ, позволили сделать анализ характеристик петлевидного и классического ГВ. Сопоставительный анализ показывает, что разница в тяговых характеристиках на различных режимах работы существенна и составляет от 5 до 25 %, в то время как разница моментов не превышает 10% в пользу петлевидного ГВ. Повышение тяговых характеристик в сочетании со снижением коэффициента моментов дает повышение эффективности работы ПГВ в виде увеличения значения КПД до 10 % (классический ГВ $\eta_p = 55$ % и петлевидный ГВ $\eta_p = 65$ % при прочих равных условиях). Снижение гидродинамического сопротивления, повышение расчетного значения КПД обуславливают снижение расхода топлива на 8–10 % практически во всем диапазоне режимов работы ГВ. Стоит отметить, что поле скоростей ПГВ в сечении за ГВ носит более равномерный характер, что способствует достижению более высокой эффективности гребного винта.

Сравнение полученного распределения возникающих кавитационных пузырьков, идентифицируемых по картине вихреобразования газообразной фракции, свидетельствует о снижении кавитационных явлений у петлевидного ГВ, что приводит к уменьшению кавитационной эрозии поверхности винта и увеличению срока его эксплуатации,

а также улучшает акустические характеристики и способствует гидродинамическому совершенствованию гребного винта.

Список источников / References

1. Месропян А. В., Галицына А. М., Меркулова А. П., Шабельник Ю. А. Перспективы реализации электродвижения в маломерном судостроении // Электротехнические системы и комплексы. 2023. № 2 (59). С. 49–54. DOI: 10.18503/2311-8318-2023-2(59)-49-54. EDN: JVTQO.
2. Mesropyan A. V., Galitsyna A. M., Merkulova A. P., Shabelnik Yu. A. Perspektivy realizatsii elektrodvizheniya v malomernom sudostroyenii [Outlook for the implementation of electric movement in shipbuilding]. *Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы. Electrotechnical Systems and Complexes*. 2023. No. 2 (59). P. 49–54. DOI: 10.18503/2311-8318-2023-2(59)-49-54. EDN: JVTQO. (In Russ.).
3. Анализ размера и доли рынка морских силовых установок — тенденции роста и прогнозы (2024–2029 гг.). URL: <https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/marine-propulsion-engine-market> (дата обращения: 18.10.2025).
4. Analiz razmera i doli rynka morskikh silovykh ustanovok — tendentsii rosta i prognozy (2024–2029 gg.) [Market and share analysis of the marine propulsion systems — growth trends and forecasts (2024–2029)]. URL: <https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/marine-propulsion-engine-market> (accessed: 18.10.2025). (In Russ.).
5. Месропян А. В., Шабельник Ю. А. О способах повышения эффективности водоходных движителей // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021. № 48 (3). С. 39–51. DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-3-39-51. EDN: MNMWGM.
6. 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. Tekhnicheskiye nauki. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2021. No. 48 (3). P. 39–51. DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-3-39-51. EDN: MNMWGM. (In Russ.).
7. Тогуняц А. Р., Анчиков С. Л., Вишневецкий Л. И. Соосные гребные винты и двухступенчатые лопастные движители // Морской Вестник. 2022. № 2 (82). С. 13–18. EDN: OUQHCI.
8. Togunyats A. R., Anchikov S. L., Vishnevskiy L. I. Soosnyye grebnyye vinty i dvukhstupenchatyye lopastnyye dvizhiteli [Contra-rotating propellers and two-stage blade propulsors]. *Morskoy Vestnik*. 2022. No. 2 (82). P. 13–18. EDN: OUQHCI. (In Russ.).
9. Афанасьев А. К., Ревенко Е. С., Ушаков К. М. Гидродинамические характеристики широколопастных гребных винтов с усеченной формой лопасти в свободной воде // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2024. Т. 16, № 4. С. 519–529. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-4-519-529. EDN: BSYAXC.
10. Afanasyev A. K., Revenko E. S., Ushakov K. M. Gidrodinamicheskiye kharakteristiki shirokolopastnykh grebnykh vintov s usechennoy formoy lopasti v svobodnoy vode [Hydrodynamic properties of propellers with large blade-area ratio and truncated blade in free water]. *Vestnik Gosudarstvennogo Universiteta Morskogo i Rechnogo FLOTA imeni Admirala S. O. Makarova*. 2024. Vol. 16, no. 4. P. 519–529. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-4-519-529. EDN: BSYAXC. (In Russ.).
11. Славгородская А. В., Славгородский В. М. Фантазии на тему гребных винтов с волнистыми лопастями // САПР и графика. 2015. № 1 (219). С. 69–72. EDN: TRQEOJ.
12. Slavgorodskaya A. V., Slavgorodskiy V. M. Fantazii na temu grebnykh vintov s volnistymi lopastyami [Fancies about propellers with wavy blades]. *SAPR i grafika. CAD and Graphics*. 2015. No. 1 (219). P. 69–72. EDN: TRQEOJ. (In Russ.).
13. Stan L. C. New innovative backflow marine propeller optimization study by CFD. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 400, Issue 8. P. 2–10.
14. Tadros M., Ventura C. Design of propeller series optimizing fuel consumption and propeller efficiency. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9, Issue 11. P. 1226. DOI: 10.3390/jmse9111226.
15. Zheng L., Chen Sh., Chen X., Ji Sh. Reverse engineering-inspired parametric 3D geometry model of marine propeller. *Polish Maritime Research*. 2023. Vol. 30. P. 35–47. DOI: 10.2478/pomr-2023-0037.
16. 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. EDN: MRPSFC.
17. Mesropyan A. V., Shabelnik Yu. A. K voprosu ob effektivnosti rabochego protessa petlevidnykh grebnykh vintov [The question of the efficiency of the workflow of loop propeller]. *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatcionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. 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. EDN: MRPSFC. (In Russ.).
18. Пат. 2780771 Российская Федерация, МПК В 63 Н 1/00. Петлевидный гребной винт / Месропян А. В., Шабельник Ю. А. № 2022106691; заявл. 15.03.22; опубл. 30.09.22, Бюл. № 28.
19. Patent. 2780771 Russian Federation, IPC B 63 H 1/00. Petlevidnyy grebnoy vint [Loop-shaped propeller] / Mesropyan A.V., Shabelnik Yu. A. No. 2022106691. (In Russ.).
20. Sharrow G. Ch., Cherry H. Propeller. US Patent 009926058B2; filed May 25th, 2017; published March 27th, 2018.
21. Abbaspour R., Yadegari M., Khoshnevis A. B. [et al.]. Optimization of horizontal spacing in cylinder-NACA0012 airfoil configuration in the Sharrow propeller using entropy generation analysis and multi-objective genetic algorithm. *Journal of Marine Science and Technology*. 2025. DOI: 10.1007/s00773-025-01097-5.
22. Bima Anugerah Putraa1, Fajri Ashfi Rayhan. Comparative Analysis of Conventional and Toroidal Propeller through CFD Methods. *CFD Letters* 2025. Vol. 18, Issue 2. P. 137–160.
23. Neslin Thavamony, Anish Kumar, Joshua Selwyn. Numerical investigation on the influence of toroidal propeller on the heat transfer enhancement of an automobile radiator. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2025. Vol. 73. P. 106661. DOI: 10.1016/j.csite.2025.106661.
24. Toroidal propellers: A noise-killing game changer in air and water. URL: <https://newatlas.com/aircraft/toroidal-quiet-propellers/> (accessed: 18.10.2025).
25. Sirousi H., Negahdari M. Numerical study and hydrodynamic analysis of Sharrow propeller. *Marine Engineering*. 2024. Vol. 20 (44) P. 24–39. DOI: 10.61186/marineeng.20.44.3.
26. Гребные винты уменьшенного шага для «Вихря». URL: https://www.barque.ru/shipbuilding/1974/propellers_reduced_pitch_for_whirlwind (дата обращения: 18.10.2025).
27. Grebnyye vinty umen'shennogo shaga dlya «Vikhrya» [Reduced pitch propellers for the Vikhr]. URL: https://www.barque.ru/shipbuilding/1974/propellers_reduced_pitch_for_whirlwind (accessed: 18.10.2025). (In Russ.).
28. Carlton J. S. Marine Propellers and Propulsion. 4th Ed. 2010. 585 p. ISBN. 978-0-08-100366-4.
29. ANSYS CFX Reference Guide. Release 2020 R2. ANSYS, Inc. July 2020.
30. Tonello N., Eude Y., Meux B., Ferrand M. Frozen rotor and sliding mesh models applied to the 3D Simulation of the Francis-99 Tokke turbine with Code_Saturne. *Journal of Physics Conference Series*. 2017. Vol. 782 (1). P. 1–12. DOI: 10.1088/1742-6596/782/1/012009.
31. Kang J. G., Kim M. C., Kim H. U., Shin I. R. 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.

23. Trejo I., Terceno M., Valle J., Iranzo A., Domingo J. Analysis of a ship propeller using CFD codes. *International Conference on computational methods in marine engineering*. 2007. 12 p.

МЕСРОПЯН Арсен Владимирович, доктор технических наук, профессор (Россия), директор Института экосистем бизнеса и креативных индустрий Уфимского государственного нефтяного технического университета (УГНТУ), г. Уфа.

SPIN-код: 7250-9161

AuthorID (РИНЦ): 17417

AuthorID (SCOPUS): 26638367100

Адрес для переписки: avm_74@mail.ru

ШАБЕЛЬНИК Юлия Андреевна, младший научный сотрудник кафедры «Гидрогазодинамика трубопроводных систем и гидромашины», заместитель директора по научной работе Института экосистем бизнеса и креативных индустрий УГНТУ, г. Уфа.

SPIN-код: 3995-9042

AuthorID (РИНЦ): 525619

Адрес для переписки: cammy@list.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 11.10.2025; одобрена после рецензирования 27.10.2025; принята к публикации 30.10.2025.

MESROPYAN Arsen Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Institute of Business Ecosystems and Creative Industries, Ufa State Petroleum Technological University (USPTU), Ufa.

SPIN-code: 7250-9161

AuthorID (RSCI): 17417

AuthorID (SCOPUS): 26638367100

Correspondence address: avm_74@mail.ru

SHABELNIK Yulia Andreevna, Junior Researcher of the Hydrogasdynamics of Pipeline Systems and Hydraulic Machines Department, Deputy Director of Research at the Institute of Business Ecosystems and Creative Industries, USPTU, Ufa.

SPIN-code: 3995-9042

AuthorID (RSCI): 525619

Correspondence address: cammy@list.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 11.10.2025; approved after reviewing 27.10.2025; accepted for publication 30.10.2025.