

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ
POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

УДК 629.5.035.5

DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-3-39-51

Обзорная статья / Review

О способах повышения эффективности водоходных движителей

А.В. Месропян, Ю.А. Шабельник

Уфимский государственный авиационный технический университет (УГАТУ),
450008, г. Уфа, ул.К.Маркса, 12, Россия

Резюме. Цель. Целью аналитического обзора является определение перспективных направлений исследований повышения эффективности водоходных движителей. **Метод.** В работе представлены обзор и анализ современных гребных винтов. **Результат.** Проведен анализ конструктивно-компоновочных и схемных решений гребных винтов, выявлены способы повышения эффективности гребных винтов, сформированы основные направления дальнейших исследований. Рассмотрены перспективы развития гребных винтов, описаны конструктивно-компоновочные и схемные решения, обеспечивающие повышение эффективности рабочего процесса, что позволяет сформировать основные направления дальнейших научных исследований. Создаваемые перспективные схемные решения тесно связаны с использованием современных численных методов на всех этапах проектирования; новые подходы созданию гребных винтов позволят обеспечить повышение КПД на 8 - 10%. **Вывод.** Повышение эффективности гребных винтов за счет моделирования рабочих процессов с использованием численных методов гидродинамики и разработки перспективных схемных решений позволит не только увеличить КПД, но и улучшить кавитационные и акустические характеристики винтов. Применение CFD-расчетов позволяет сократить сроки, затраты и объемы доводочных работ изделия.

Ключевые слова: гребные винты, винторулевые колонки, направляющие насадки, соосные винты, направляющие лопасти, петлевидные винты

Для цитирования: А.В. Месропян, Ю.А. Шабельник О способах повышения эффективности водоходных движителей. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48(3): 39-51. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-3-39-51

On ways to improve the efficiency of water propellers

A.V. Mesropyan, Yu.A. Shabelnik

Ufa State Aviation Technical University (USATU),
12 K. Marx St., Ufa 450008, Russia

Abstract. Objective. The purpose of the analytical review is to identify promising areas of research to improve the efficiency of water propellers. **Method.** The research provides an overview and analysis of modern propellers. **Result.** The analysis of the design – layout and schematics solutions of propeller is carried out, methods of increasing the efficiency of propellers are revealed, the main directions of further research are formed. Prospects for the development of propellers are considered, structural and layout and circuit solutions are described that ensure an increase in the efficiency of the working process, which allows to form the main directions of further scientific research. Created promising circuit solutions are closely related to the use of modern numerical methods at all stages of design, new approaches to the creation of propellers will provide an increase in efficiency by 8-10%. **Conclusion.** Increasing the efficiency of propellers, due to modeling workflows using numerical methods of hydrodynamics, and developing advanced schematics solutions, will not only increase the efficiency, but also improve the cavitation and acoustic characteristics of the propellers. The use

of CFD calculations allows you to reduce the time, costs and volumes of product development work.

Keywords: propellers, rudder propellers, pilot nozzles, coaxial propellers, guide vanes, loop propellers

For citation: A.V. Mesropyan, Yu. A. Shabelnik. On ways to improve the efficiency of water propellers. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48(3): 39-51. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-3-39-51

Введение. Многоплановые требования, предъявляемые к движителям судов, способствовали появлению многообразных типов и схем движителей. Движители, работающие по гидрореактивному принципу, можно классифицировать на лопастные, водометные и комбинированные движители. К лопастным движителям относятся как гребные винты (ГВ), так и крыльчатые движители. Гребные винты наиболее широко распространены на судах разного типа от катеров до крупных контейнеровозов и танкеров. Совершенствование ГВ включает в себя не только задачи увеличения КПД, но также и оптимизации рабочих процессов, улучшения акустических, вибрационных и кавитационных характеристик.

Постановка задачи. В настоящее время актуальными остаются такие задачи как увеличение тяги, сведение к минимуму кавитации, шума и вибраций, увеличение маневренности и безопасности ГВ. Повышение эффективности ГВ предполагает уменьшение потерь мощности, сопровождающих работу ГВ. По природе возникновения потерь можно выделить основные их типы: потери на создание вызванных осевых и окружных скоростей, концевые и профильные потери. Потери на создание вызванных осевых скоростей возникают у любого гидравлического движителя, их снижение до нуля невозможно в принципе.

Интенсивное развитие технологий автоматизированного проектирования и производства ГВ в последние десятилетия способствовало доведению практически до совершенства формы профиля сечений и других геометрических параметров лопасти ГВ. Дальнейшее улучшение конструкции традиционных ГВ уже не дает существенного повышения гидродинамических характеристик. Можно утверждать, что профильные потери современных ГВ также сведены к минимальным значениям [1]. Дальнейшее повышение эффективности ГВ возможно за счет уменьшения вихревых потоков, возникающими при работе ГВ.

Методы исследования. Аналитический обзор научных публикаций показал широкое разнообразие энергоэффективных схемных решений ГВ, которые в течение многих лет развивались для повышения скорости, экономичности и снижения уровня шума.

Рассматривая эффективность ГВ, стоит отметить, что максимальные значения КПД η_p ГВ достигаются на расчетных режимах работы, при проектировании ГВ стремятся, чтобы он работал в области максимальных значений КПД, который может достигать 70 – 75% при оптимальных величинах основных параметров, но на практике реальный КПД винтов оказывается меньше – от 65% и ниже, так как кроме геометрических и кинематических параметров самого ГВ на КПД оказывают влияние и обводы корпуса судна, его скорость, условия эксплуатации.

Зависимость КПД движителя от скорости судна для различных движителей представлена на рис. 1 [2], данные кривые показывают, что применение традиционных ГВ целесообразно, когда скорости судна не превышают 40 узлов, суперкавитирующие гребные винты (СКВ) наряду с водометными движителями эффективно используются на быстроходных судах.

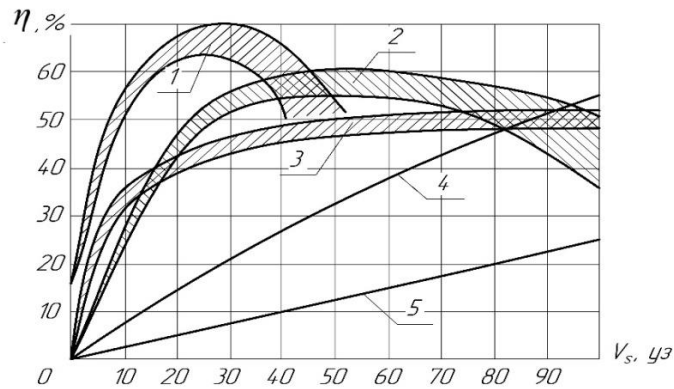


Рис. 1. Зависимость КПД для различных движителей: 1 – гребной винт; 2 – суперкавитирующий гребной винт; 3 – водометный движитель; 4 – воздушный винт; 5 – воздушно-реактивный двигатель

Fig. 1. Dependence of efficiency for different propulsor: 1 – propeller; 2 – Supercavitating propeller; 3 – water jet; 4 – air propeller; 5 – air-jet engine

Области применения ГВ и СКВ (рис.2) определяется по зависимости числа кавитации от относительной поступи (λ_p), определяющей режим работы ГВ.

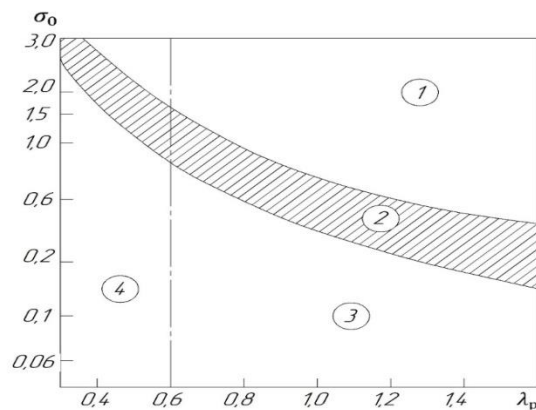


Рис. 2. Области применения обычных и суперкавитирующих ГВ: 1 – наилучшая зона для обычных ГВ; 2 – зона частичной кавитации; 3 – наилучшая зона для СКВ; 4 – зона низких КПД для любых ГВ

Fig. 2. Applications for conventional and supercavitating propellers: 1 – best area for conventional propellers; 2 – zone of partial cavitation; 3 – the best zone for supercavitating propellers; 4 – zone of low efficiency for any propellers

Число кавитации характеризует величину разрежения на лопасти и может быть определено как [3]:

$$\sigma_0 = \frac{2(p_0 - p_v)}{\rho v_a^2} \quad (1)$$

p_0 – давление в потоке перед ГВ, Па; p_v – давление насыщенных паров воды, Па;
 ρ – плотность воды, кг/м³; v_a – осевая скорость, м/с.

Применение СКВ целесообразно в области 3 диапазона значений относительной поступи гребного винта и числа кавитации. Область 2, промежуточная, определяет такие режимы работы, при которых будет наблюдаться частичная кавитация на лопастях как обычных, так и кавитирующих винтов. Эта область ограничена двумя кривыми, которые соответствуют значениям местного числа кавитации на относительном радиусе $x=r/R=0,7$ (R – радиус винта, r – радиус сечения лопасти) $\sigma_{0,7}=0,05$ и $0,10$ [4].

Сильно развитая кавитация характерна тем, что вся засасывающая поверхность лопасти охвачена каверной, основная часть упора гребного винта создается за счет давления на нагнетающей поверхности. Профилирование засасывающей поверхности

лопасти в этом случае, с точки зрения гидродинамики, значения не имеет: ее форма лишь должна способствовать образованию каверны оптимальных размеров, при которой сопротивление формы профиля сечения лопасти будет наименьшим.

Основываясь на этом, В. Л. Поздюнин разработал для СКВ клиновидный профиль сечения лопасти с искривленной нагнетающей поверхностью (рис. 3) [5].

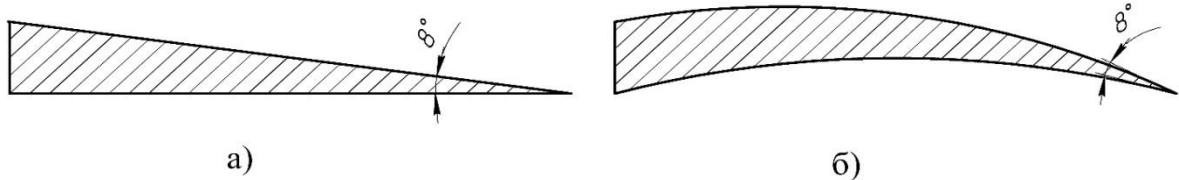


Рис. 3. Профили сечений лопасти СКВ: а – с прямой поверхностью; б – с искривленной поверхностью

Fig. 3. Supercavitating propeller blade section profiles: a – with a straight surface; b – with a curved surface

Входная кромка СКВ выполняется острой, а наибольшая толщина профиля смещена к выходящей кромке, в результате уменьшается взаимное влияние каверн в межлопастном пространстве, а гидродинамические характеристики ГВ повышаются.

Лопастей СКВ с клиновидным поперечным сечением провоцируют повышенное вихреобразование позади тупой выходящей кромки, работая на режимах бескавитационного обтекания или при частично развитой кавитации.

Вследствие этого КПД СКВ на скоростях движения судна отличных от рабочего режима оказывается ниже, чем у обычных ГВ, что приводит к нецелесообразности их применения на большинстве судов.

Современные формы ГВ для двигателей большой мощности проектируются с заметным отгибом выходящей кромки (интерцептором), который препятствует потере упора (подобно закрылку самолетного крыла), позволяет уменьшить проскальзывание и в итоге увеличивает КПД (рис. 4).

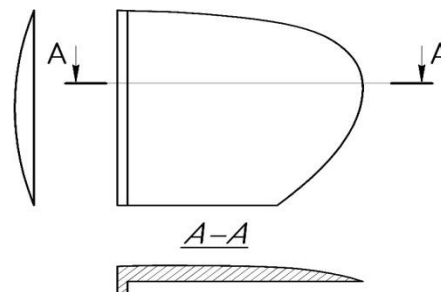


Рис. 4. Лопасть ГВ с интерцептором: 1 – интерцептор
 Fig. 4. Interceptor propeller blade: 1 - interceptor

Высота интерцептора, как правило, составляет 2% от хорды профиля сечения лопасти ГВ, регулирование высоты интерцептора позволяет изменять гидродинамические характеристики ГВ, упрощая согласование параметров ГВ и силовой установки в зависимости от нагрузки судна.

Эффективное использование ГВ при больших скоростях движения судна (свыше 45 узлов) возможно в случае применения полупогруженных или частично-погруженных винтов (ЧПВ), схема ЧПВ представлена на рис. 5. Соответственно ЧПВ используются, в основном, на быстроходных судах.

Основным параметром ЧПВ является степень погружения

$$I_T = \frac{T}{D} < 1, \quad (2)$$

где T – глубина погружения нижней кромки ГВ;
 D – диаметр ГВ.

В зависимости от степени погружения изменяется коэффициент упора [6, 7], требуемое погружение ГВ рассчитывается для использования полной мощности и создаваемой при этом тяги.

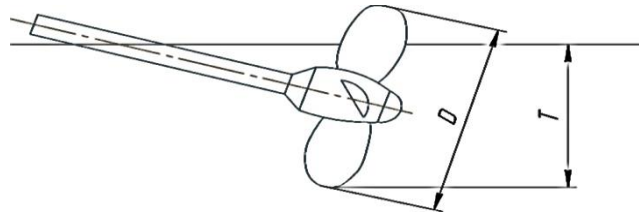


Рис. 5. Частично погруженный винт
Fig. 5. Partially submerged propeller (PSP)

Зарубежные специалисты [3, 7] сходятся во мнении, что ЧПВ являются наиболее перспективным типом движителя для глиссеров. Приводы с ЧПВ особенно хорошо зарекомендовали себя при скоростях от 45 узлов до 110 узлов. При повышении скоростей выше 45 узлов применяют винты с большим наклоном лопастей и малым дисковым отношением.

Дальнейшее повышение скорости выше 60 узлов, делает целесообразным применение суперкавитирующих ГВ с клиновидным выпукло-вогнутым профилем лопастей (рис. 6).



Рис. 6. Суперкавитирующие ЧПВ
Fig. 6. Supercavitating PSP

Эффективность СКВ ЧПВ повышается за счет захватывания воздуха и вентиляции каверн с пониженным давлением, которые образуются на засасывающей стороне лопасти.

ЧПВ не находят широкого распространения, что обусловлено рядом характерных для них недостатков, среди которых можно отметить асимметричное обтекание, приводящее к появлению боковой силы и изменению ходовых качеств, увеличение кренящего момента, высокий уровень вибраций и низкие величины упора на низких оборотах, что затрудняет выход на расчетный режим судна. Теория ЧПВ недостаточно широко изучена, но они представляют большой интерес для быстроходных катеров [8].

Наиболее известной конструкцией, позволяющей уменьшить возникающие потери и завихрения, является ГВ с направляющей кольцевой насадкой, которая была изобретена в ходе работ по улучшению характеристик ГВ Л. Кортом в 1925 году [9], в ходе работ по улучшению характеристик ГВ. Она представляет собой кольцевую насадку (короткое сопло), внутри которой размещается гребной винт (рис. 7).

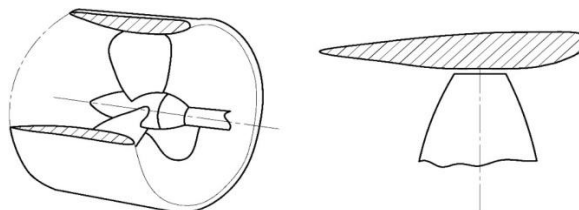


Рис. 7. Общий вид ГВ с направляющей насадкой
Fig. 7. General view of a propeller with a nozzle

ГВ с насадками успешно используются при необходимости создания дополнительного упора на малых скоростях хода. На профиле насадки возникает

циркуляция скорости, увеличивая скорость протекания воды через диск ГВ, что приводит к некоторому увеличению его КПД.

Стоит отметить, что это увеличение скорости, созданное насадкой, тем больше, чем меньше скорость хода судна.

Исследования показывают, что пропульсивные качества судна повышаются пока уменьшение потерь на перетекание жидкости у концов лопастей ГВ не превышает величину потерь мощности на преодоление сопротивления насадки, обусловленного вязкостью жидкости [10].

Применение направляющих насадок эффективно при работе с большими коэффициентами нагрузки, они используются на буксирах-якорезаводчиках, на рыболовных траулерах, где применение насадок обеспечивается до 40 – 50% упора ГВ при низких и близких к нулю скоростях хода.

С уменьшением коэффициента нагрузки эффективность направляющих насадок снижается, при скоростях, превышающих 10 узлов, сопротивление насадки быстро возрастает и на режиме полного хода направляющие насадки неэффективны. Применение направляющих насадок на быстроходных катерах нецелесообразно.

Повышение требований к маневренности таких судов как ледоколы, траулеры привело к появлению схем ГВ на поворотных колонках (рис. 8).

Поворотные винторулевые колонки по своей сути являются ГВ (иногда ГВ в насадке), направление упора которых может изменяться в широких пределах путем поворота самой колонки относительно своей вертикальной оси.

Полноповоротные винторулевые колонки вращаются на 360°, и могут работать как толкающие и как тянущие ГВ. Поворотные колонки обеспечивают высокую маневренность при любых скоростях хода судна.



Рис. 8. Полноповоротные винторулевые колонки ледокола «Обь»
Fig. 8. Full-revolving Rudderpropeller of the icebreaker "Ob"

Наиболее широко используемой полноповоротной винторулевой колонкой является движитель Azipod, представляющий собой безредукторную систему с электродвигателем, расположенным в гондole за пределами корпуса судна. Электродвигатель позволяет использовать крутящий момент без ограничений, не зависимо от частоты вращения ГВ, ввиду отсутствия зубчатых передач, частотный преобразователь позволяет регулировать скорость и направление вращения силовой установки.

Помимо высокой маневренности, рамная конструкция Azipod выдерживает высокие ударные нагрузки, имеет низкие вибрацию и шум, что и обеспечивает ее широкое применение на ледоколах.

Развитие теории ГВ способствовало появлению сложных схем ГВ, которые представляют собой конструкции с двумя и более вращающимися винтами (рис. 9):

- при тандемном расположении ГВ соосны, вращаются в одном направлении и с одинаковой угловой скоростью;

- парные ГВ – это конструкция из двух соосных ГВ, которые вращаются в противоположные стороны (при этом внутри полого вала помещают второй вал, один из винтов вращает наружный вал, а второй – внутренний);

- ГВ с перекрывающимися дисками, таким образом, оба ГВ работают в области действия более интенсивного попутного потока, что дает улучшение пропульсивных качеств.

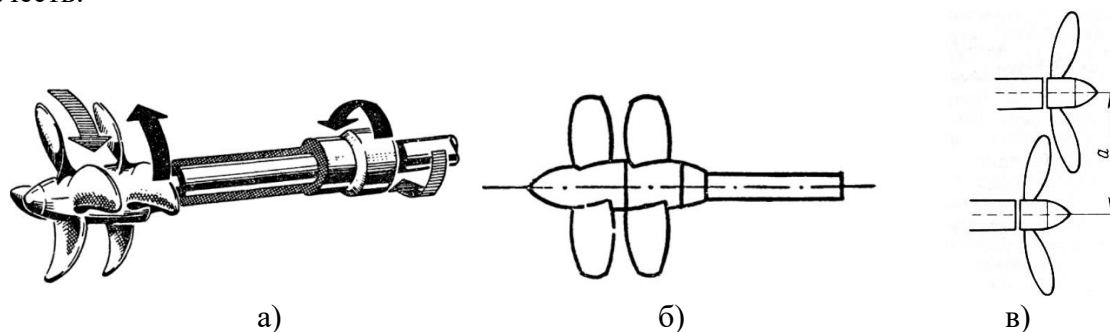


Рис. 9. Гребные винты сложных схем: а – соосные ГВ парные; б – ГВ тандемы; в – ГВ с перекрывающимися дисками

Fig. 9. Propellers complex schemes: a – coaxial twin propellers; b – tandem propellers; c – propellers with overlapping discs

Основное преимущество соосных винтов заключается в улучшении кавитационных характеристик за счет увеличения площади поверхности лопастей [11]. Соосные парные ГВ имеют более высокий КПД, но имеют более сложную конструкцию. Для привода парных ГВ иногда используют электродвигатели с целью некоторого упрощения конструкции, поскольку электродвигатель позволяет исключить редуктор. Соосные ГВ могут эффективно использоваться на быстроходных катерах с большой мощностью двигателя, поскольку позволяют реализовать больший упор, уменьшив при этом оптимальный диаметр ГВ.

ГВ с перекрывающимися дисками при корректном выборе формы и взаимного расположения винтов, позволяют повысить пропульсивный коэффициент на 20% по сравнению с традиционной двухвальной компоновкой, а уменьшение потребляемой мощности составляет до 6%. ГВ с перекрывающимися дисками практически не применяются, что связано с недостаточной их изученностью, а также сложностью реализации эффективной совместной работы во всем диапазоне скоростей [11].

Объединяя идеи винторулевых колонок и соосных ГВ, реализуют и более сложные схемы движителей (рис. 10).

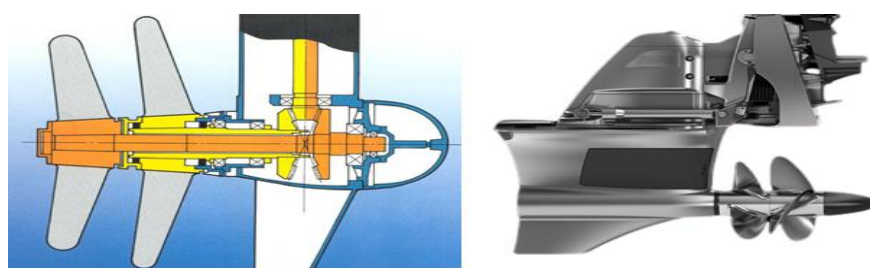


Рис. 10. Винторулевая колонка с соосными винтами

Fig. 10. Coaxial rudderpropeller

Преимуществами такой конструкции являются высокая маневренность, возможность развивать большую максимальную скорость, топливная экономичность.

Способы существенно повысить КПД традиционных ГВ уже себя исчерпали, традиционные ГВ за многолетнюю историю развития доведены до своего совершенства, их проектирование осуществляется по стандартным методикам и отработанным технологиям. Расширение области эффективного применения ГВ – увеличение максимального КПД и режимов бескавитационной работы при больших скоростях судна, возможно с использованием перспективных схемных решений ГВ.

Оптимизация гребного винта – это многокритериальная задача, целью которой является улучшение гидродинамических характеристик. В настоящее время ведутся работы как по исследованию рабочего процесса, улучшения гидродинамических характеристик ГВ, так и по созданию нетрадиционных схем ГВ. Развитие не только подходов к проектированию ГВ, но и технологий производства обуславливает появление конструктивно сложных вариантов лопастей винтов, изготовление которых в настоящее время не представляется трудоёмким.

Используя подходы к созданию нетрадиционных схем ГВ, в работе [12] рассматривается разработка схемы ГВ с отверстиями на концевой части лопасти (рис. 11, а), с применением CFD-методов. Рассчитанное увеличение КПД такого ГВ в сравнении с обычным составляет 8-9%, экспериментального подтверждения увеличения КПД автором не приводится. ГВ с отверстиями в лопастях рассматривались уже и ранее, например, в работе [13] (рис. 11, б) также предполагает снижение рассеяния энергии и, следовательно, повышение эффективности работы ГВ. Серийного применения ГВ с отверстиями пока не находят.

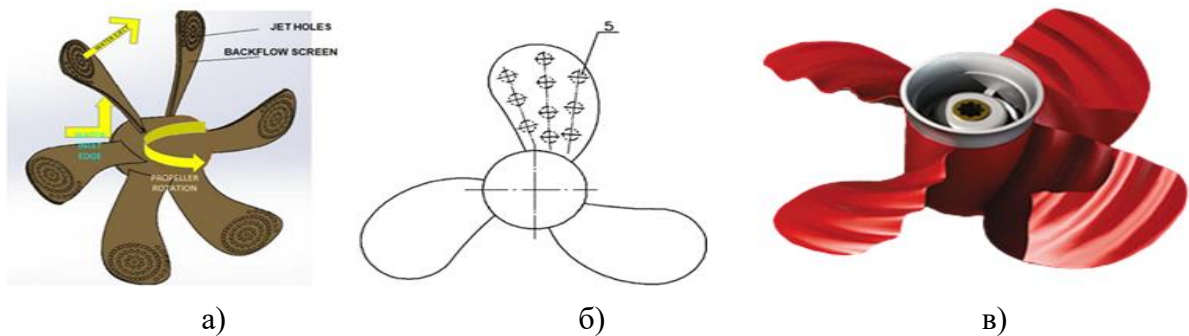


Рис. 11. Гребные винты: а – с отверстиями на концевой части; б - с отверстиями по всей лопасти; в – с волнистыми лопастями

Fig. 11. Propellers: a – with holes on the end portion; b – with holes all over the blade; c – wavy blades

В работе [14] рассматривается бионический подход к моделированию ГВ – ГВ с волнистыми лопастями (рис. 11, в). Моделирование формы лопастей, с использованием численных методов, основывалось на идее воссоздания морских раковин. В результате достигнуто:

- снижение изгибно-крутильных колебаний и повышение КПД за счет увеличения площади радиальных сечений;
- увеличение жесткости за счет снижения деформации выходящей тонкой кромки;
- уменьшение кавитации и снижение уровня шума, благодаря удержанию пограничного слоя набегающего потока на лопасти волнистой формы и более равномерному его распределению на поверхности.

Работа [15], посвященная подходу к разработке ГВ с использованием бионического моделирования, предлагает форму ГВ, приведенную на рис. 12.



Рис. 12. Бионический гребной винт

Fig. 12. Bionic Propeller

Конструкция ГВ имеет петлевидную форму с концевой частью, повторяющей оперение птичьих крыльев, ГВ разработан с использованием бионических подходов к

моделированию, связанных с изучением парящего полета птиц. По данным, приведенным в работе по бионическому ГВ, увеличение тяги составляет 19%, а снижения уровня шума 30% [15].

Разработчики современных серийных ГВ добиваются повышения эффективности путем профилирования. К примеру, гребной винт C-FOIL [16] (рис. 13, а), серийно выпускаемый английской компанией Teignbridge, является новейшей разработкой в области дизайна винтов, он имеет улучшенную, препятствующую кавитации форму сечения лопасти, которая увеличивает тягу и улучшает эффективность ГВ: обеспечивает примерно на 10% большую тягу и на 12% больший КПД по сравнению со стандартными моделями винта, обеспечивая повышение производительности и экономию топлива.

Специально спроектированные лопасти ГВ C-FOIL позволяют развивать высокие скорости от 35 узлов без кавитации [17]. Нестандартную форму ГВ предлагает нидерландская компания Poseidon Propulsion Inc (рис. 13, б), создавшая, путем сложного профилирования, форму бесшумного, некавитирующего ГВ [18].



Рис. 13. Гребные винты: а – Teignbridge C-Foil; б – Poseidon Silent Thruster
Fig. 13. Propellers: a – Teignbridge C-Foil; b – Poseidon Silent Thruster

Гребные винты Poseidon Silent Thruster (PSTP) предназначены для прогулочных яхт и коммерческих судов, но могут быть адаптированы к любому двигателю и размеру.

Исследования влияния вихревых явлений на рабочий процесс ГВ способствовали созданию конструкций с направляющими лопастями. Направляющие лопасти (рис. 14, а), установленные на втулке после ГВ, эффективно используют вихревые потоки, которые возникают при вращении ГВ.

Конструкция PBCF (Propeller Boss Cap Fins), предотвращает образование втулочного вихря, позволяя достичь экономию топлива до 5% [19, 20]. Конструкция PSP (Pre-swirl Stator Propeller) представляет собой статорные лопатки, расположенные перед ГВ (рис. 14, б).

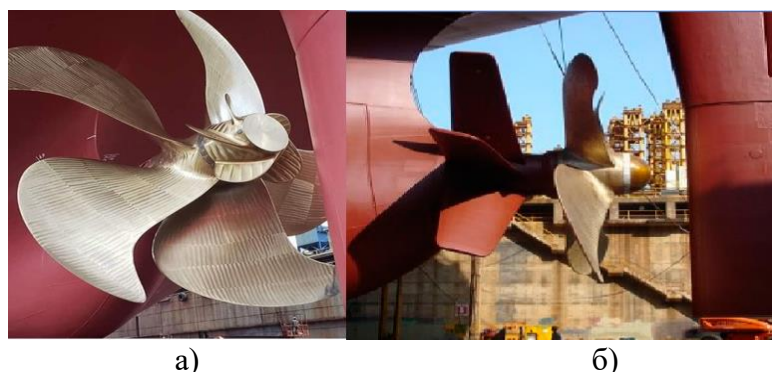


Рис. 14. Направляющие лопасти гребного винта: а – устанавливаемые после винта (Boss Cap Fins); б – устанавливаемые перед винтом (Pre-swirl Stator)
Fig. 14. Propeller guide vanes: a – Boss Cap Fins; b – Pre-swirl Stator

Лопатки статора создают направленный поток, закрученный в направлении противоположном направлению вращения ГВ, обеспечивая благоприятные условия для его работы, снижая потери мощности и повышая эффективность ГВ [21, 22].

Большую часть потерь мощности создают концевые потери, для их снижения применяются ГВ с концевыми пластинами [23, 24], называемые Contracted Loaded Tip (CLT) Propeller (рис. 15, а).



а)



б)

Рис. 15. Гребные винты: а – с концевыми пластинами (Contracted Loaded Tip Propeller); б – Sharrow propeller

Fig. 15. Propellers: a – Contracted Loaded Tip Propeller; b – Sharrow propeller

Применение CLT-винтов позволяет повысить КПД на 5-8%, снижает расход топлива до 10% и улучшает кавитационные характеристики, однако на нерасчетных режимах работы эффективность CLT-винтов оказывается ниже традиционных ГВ [23].

Объединяя тенденции современных подходов к созданию ГВ, компания Sharrow Engineering LLC разработала по-настоящему уникальную конструкцию ГВ (рис. 15, б) [25, 26], обеспечивающую, по сравнению с традиционными гребными винтами, следующие преимущества:

- снижение удельного расхода топлива в широком диапазоне оборотов;
- увеличение скорости судна;
- отличная маневренность и управляемость;
- вихри и кавитация не образуются на петлевой конструкции;
- практически полное отсутствие вибрации;
- снижение уровня шума.

Идея эффективности петлевых винтов (ГВ Sharrow, Бионический ГВ bigrep) основывается на исключении концевых вихрей, которые, как было указано выше, создают большие потери.

В работе [27] автор приводит методику расчета тороидальных ГВ на основе ленты Мебиуса и также отмечает снижение гидродинамических потерь и увеличение упора на 5 – 10%.

К преимуществам петлевых винтов также можно отнести неконсольное закрепление лопасти, что обеспечивает большую прочность конструкции.

Компанией Sharrow Engineering LLC в настоящий момент изготовлены петлевые винты для лодочных двигателей небольшой мощности, но основной акцент направлен на создание серийных моделей для мощных подвесных двигателей и кормовых приводов от 100 л.с. до 450 л.с., так как на них эффект от экономии топлива будет наиболее заметен.

Обсуждение результатов. Сопоставительный анализ схем и характеристик КПД водоходных движителей различных схем показывает, что применение перспективных схемных решений ГВ способствует повышению КПД, топливной экономичности и достижению больших скоростей судна.

Рассмотрены перспективы развития ГВ, описаны конструктивно-компоновочные и схемные решения, обеспечивающие повышение эффективности рабочего процесса, что позволяет сформировать основные направления дальнейших научных исследований. Создаваемые перспективные схемные решения тесно связаны с использованием современных численных методов на всех этапах проектирования, новые подходы созданию ГВ позволят обеспечить повышение КПД на 8 - 10%.

Кроме того, применение CFD-расчетов позволяет сократить сроки, затраты и объемы доводочных работ изделия.

Создание сложного профилирования лопастей невозможно без расчета гидродинамических характеристик проектируемого ГВ в специализированных пакетах для CFD-расчетов, позволяющих определить диапазоны оптимальных параметров ГВ, а также оценить кавитационные явления на ранних стадиях проектирования и, в итоге, сократить объемы натурных испытаний.

Вывод. ГВ нетрадиционных схем с элементами бионического дизайна обладают определенными преимуществами перед традиционными ГВ, что предопределяет актуальность исследований, направленных на моделирование рабочих процессов и реализацию новых схемных решений, обеспечивающих повышение КПД.

Обзор патентов и научных публикаций, посвященных разработке схемных решений ГВ, показал, что реализация конструкций с элементами сложного профилирования, таких как петлевидные ГВ, лопасти с комбинированными профилями, с элементами бионического моделирования, разработанных с использованием современных численных методов, способствует не только повышению эффективности ГВ, но и улучшению акустических и кавитационных характеристик ГВ.

Библиографический список:

1. Жинкин В.Б. Теория и устройство корабля: Учебник. – 3-е издание. – СПб.: Судостроение, 2002. – 336с.
2. Куликов С.В., Храбкин М.Ф. Водометные движители (теория и расчет). – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Судостроение, 1980. – 312с.
3. Carlton J.S. Marine Propellers and Propulsion. – 4 ed., 2010. – 585 p.
4. Корытов Н.В. Суперкавитирующие гребные винты // Журнал «Катера и яхты», 1975, №01(053). с. 46 – 50.
5. Басин А.М., Миниович И.Я. Теория и расчет гребных винтов. – Л.: ГСИ СудПром, 1963. – 760с.
6. Ferrando M. Performance of a family of surface piercing propellers / Ferrando M., Scamardella A., Bose N., Liu P. International Journal of Maritime Engineering, 2002. Transactions of the Royal Institution of Naval Architects Part A. pp. 63 – 70.
7. Ghassemi H. Hydrodynamic characteristics of the surface-piercing propeller for the planning craft/ Ghassemi H., Shademani R. Proceedings of the ASME 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. OMAE2009-79963. 2009. pp. 2 – 8.
8. Жинкин В.Б. Частично погруженные гребные винты / Журнал «Катера и Яхты» 2007- №3(207) - с. 106 – 109.
9. Kort L. Патент на изобретение №2030375 (US) – Combined Device of a Ship's Propeller Enclosed by a Nozzle, 1936.
10. Басин А.М., Степанюк Е.И. Руководство по расчету и проектированию гребных винтов судов внутреннего плавания. Л.: Изд-во «Транспорт», 1977. – 269 с.
11. Справочник по теории корабля: В трех томах. Том 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители/ Под ред. Я.И. Войткунского. Л.: Судостроение, 1985. 768с.
12. Stan L.C. New Innovative Backflow Marine Propeller Optimization Study by CFD/ L.C. Stan, I. Calimanescu and V. Popa // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 400, Issue 8, 2018. pp. 2 – 10.
13. Рогов В.А. Патент на изобретение №216.012.4039 – Гребной винт, 20.05.2013.
14. Славгородская А.В. Фантазии на тему гребных винтов с волнистыми лопастями / Славгородская А.В., Славгородский В.М., Немкин Д.В. // САПР и графика. 2015 № 1(219): с. 69 – 72.
15. Florian Schärfer. Bionic propeller: nature inspiring innovation. [электронный ресурс] URL:// <https://bigrep.com/posts/bionic-propeller-nature-inspiring-innovation/>
16. Propeller Designs [электронный ресурс] // Режим доступа – <https://teignbridge.co.uk/products-2/marine-propellers/propeller-designs/>
17. Teignbridge propellers teams up with plymouth university / Katina Read [электронный ресурс] // Режим доступа – <https://www.maritimejournal.com/news101/power-and-propulsion/teignbridge-propellers-teams-up-with-plymouth-university/>
18. Poseidon propulsion BV [электронный ресурс] // Режим доступа – <https://www.poseidon-bv.nl/custom-made-propellers/custom-made-propellers/>
19. Kawamura T. Model and full scae CFD analysis of propeller boss cap fins (PBCF) / Kawamura T., Ouchi K., Takeuchi S.// Third International Symposium on Marine Propulsor, Launceston, Australia, May 2013, pp. 486 – 493.

20. Lim Sang-Seop. Parametric Study of propeller boss cap fins for container ships / Lim Sang-Seop, Kim T.W., Lee D.M., Kang C.G., Kim S.Y. // *Int.J.Nav.Archit. Ocean Engineering* (2014) 6: pp. 187 – 205.
21. Saettone S. Pre-Swirl Stator and Propeller Design for Varying Operating Conditions. Saettone, S., Regener, P. B., & Andersen P. // In U. Dam Nielsen, & J. Juncher Jensen (Eds.), *Proceedings of the 13th International Symposium on PRACTical Design of Ships and Other Floating Structures (PRADS' 2016)* Technical University of Denmark. 2016; 27 – 36.
22. Li H. The Transient Prediction of a Pre-Swirl Stator Pump-Jet Propulsor and a Comparative Study of Hybrid RANS/LES Simulation on the Wake Vortices / Li H., Huang Q., Pan G., Dong X., // *Ocean Engineering Volume* 203, 107224, 2020.
23. Gennaro G. Improving the Propulsion Efficiency by means of Contracted and Loaded Tip Propellers / Gennaro G., Gonzalez-Adalid J. 30th Symposium on Naval Hydrodynamics Hobart, Australia, 2-7 November 2014; 1 – 17.
24. Kang J.G. Study on Propulsion Performance by Varying Rake Distribution at the Propeller Tip / Kang J.G., Kim M.C., Kim H.U., Shin I.R. *Journal of Marine Science and Engineering* 2019; 7 (386):12.
25. Gregory Charles Sharrow, Cherry Hill. Патент на изобретение №009926058B2 (US) – Propeller, 27.05.2018.
26. Sharrow Engineering Propeller [электронный ресурс] // Режим доступа – <https://boattest.com/Sharrow-Engineering-Propeller/>
27. Богатырев М.Д. Совершенствование конструкции гребного винта на судах лесосплавного флота. Дис. ... кандидата технических наук, Марийский гос. тех. ун-т, Йошкар-Ола, 2006 – 156 с.

References:

1. Zhinkin V.B Theory and structure of the ship: Textbook. 3rd edition. SPb: [Sudostroyeniye] Shipbuilding, 2002. 336p (In Russ)
2. Kulikov S.V., Khramkin M.F. Water jets (theory and calculation). 3rd ed., Rev. and Add. [Sudostroyeniye] Shipbuilding, 1980; 312. (In Russ)
3. Carlton J.S. Marine Propellers and Propulsion. 4 ed., 2010; 585.
4. Korytov N.V. Supercavitating propellers. [Katera i Yakhty], *Boats and Yachts*, 1975; 01(053): 46 – 50. (In Russ)
5. Basin A.M., Miniovich I.YA. Teoriya i raschet grebnykh vintov., [L.: GSI SudProm] *GSI SudProm*, 1963; 760. (In Russ)
6. Ferrando M. Performance of a family of surface piercing propellers / Ferrando M., Scamardella A., Bose N., Liu P. *International Journal of Maritime Engineering*. Transactions of the Royal Institution of Naval Architects Part A. 2002; 63 – 70.
7. Ghassemi H. Hydrodynamic characteristics of the surface-piercing propeller for the planning craft/ Ghassemi H., Shademani R. *Proceedings of the ASME 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. OMAE2009-79963. 2009; 2 – 8.
8. Zhinkin V.B. Partially submerged propellers [Katera i Yakhty], *Boats and Yachts*, 2007; 3(207):106 - 109. (In Russ)
9. Kort L. Patent №2030375 (US) – Combined Device of a Ship's Propeller Enclosed by a Nozzle, 1936.
10. Basin A.M., Stepanyuk Ye.I. Guidelines for the calculation and design of propellers for inland navigation vessels. - L.: Publishing house "Transport", 1977; 269. (In Russ)
11. Handbook of Ship Theory: In Three Volumes. Volume 1. Hydromechanics. Resistance to ship traffic. Ship propellers / Ed. ME AND. Voitkunsky. - L. : [Sudostroyeniye] *Shipbuilding*, 1985;768. (In Russ)
12. Stan L.C. New Innovative Backflow Marine Propeller Optimization Study by CFD/ L.C. Stan, I. Calimanescu and V. Popa . *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018; 400(8): 2 – 10.
13. Rogov V.A. Patent for invention №216.012.4039 [Grebnoy vint] *Propeller*, 20.05.2013. (In Russ)
14. Slavgorodskaya A.V. Fantasies on the theme of propellers with wavy blades / Slavgorodskaya A.V., Slavgorodsky V.M., Nemkin D.V. [SAPR i grafika] *CAD and graphics*. 2015; 1 (219): 69 - 72. 9 In Russ]
15. Florian Schärfer. Bionic propeller: nature inspiring innovation. [electronic resource] // Access mode – URL:// <https://bigrep.com/posts/bionic-propeller-nature-inspiring-innovation/>
16. Propeller Designs [electronic resource] // Access mode – <https://teignbridge.co.uk/products-2/marine-propellers/propeller-designs/>
17. Teignbridge propellers teams up with plymouth university / Katina Read [electronic resource] // Access mode – <https://www.maritimejournal.com/news101/power-and-propulsion/teignbridge-propellers-teams-up-with-plymouth-university/>
18. Poseidon propulsion BV [electronic resource] // Access mode – <https://www.poseidon-bv.nl/custom-made-propellers/custom-made-propellers/>
19. Kawamura T. Model and full scae CFD analysis of propeller boss cap fins (PBCF) / Kawamura T., Ouchi K., Takeuchi S. Third International Symposium on Marine Propulsor, Launceston, Australia, May 2013; 486 – 493.
20. Lim Sang-Seop. Parametric Study of propeller boss cap fins for container ships / Lim Sang-Seop, Kim T.W., Lee D.M., Kang C.G., Kim S.Y. // *Int.J.Nav.Archit. Ocean Engineering*. 2014; 6:187 – 205.
21. Saettone, S. Pre-Swirl Stator and Propeller Design for Varying Operating Conditions./ Saettone, S., Regener, P. B., & Andersen, P.// In U. Dam Nielsen, & J. Juncher Jensen (Eds.), *Proceedings of the 13th International*

Symposium on PRACTical Design of Ships and Other Floating Structures (PRADS' 2016) *Technical University of Denmark*. 2016; pp. 27 – 36.

22. Li H. The Transient Prediction of a Pre-Swirl Stator Pump-Jet Propulsor and a Comparative Study of Hybrid RANS/LES Simulation on the Wake Vortices / Li H., Huang Q., Pan G., Dong X. *Ocean Engineering*. 2020; 203: 107224.

23. Gennaro G. Improving the Propulsion Efficiency by means of Contracted and Loaded Tip Propellers / Gennaro G., Gonzalez-Adalid J. // 30th Symposium on Naval Hydrodynamics Hobart, Australia, 2-7 November 2014; 1 – 17.

24. Kang J.G. Study on Propulsion Performance by Varying Rake Distribution at the Propeller Tip / Kang J.G., Kim M.C., Kim H.U., Shin I.R. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2019; 386 (7): 12.

25. Gregory Charles Sharrow, Cherry Hill. Patent №009926058B2 (US) *Propeller*, 27.05.2018.

26. Sharrow Engineering Propeller [electronic resource] // Access mode – <https://boattest.com/Sharrow-Engineering-Propeller/>

27. Bogatyrev M.D. Improving the design of the propeller on the ships of the timber floating fleet. Dis. ... Candidate of technical sciences, Mari state. those. un-t, Yoshkar-Ola, 2006; 156. (In Russ)]

Сведения об авторах:

Месропян Арсен Владимирович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической механики; e-mail: avm_74@mail.ru

Юлия Андреевна Шабельник, старший преподаватель, кафедра теоретической механики; e-mail: cammy@list.ru

Information about the authors:

Arsen V. Mesropyan, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Theoretical Mechanics; e-mail: avm_74@mail.ru

Yulia A. Shabelnik, Senior Lecturer, Department of Theoretical Mechanics; e-mail: cammy@list.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 20.06.2021.

Одобрена после рецензирования/Revised 21.07.2021.

Принята в печать/Accepted for publication 29.07.2021.