

УДК 629.5.035.5

DOI: 10.34046/aumsuomt90-11

ПРОВЕРКА ГИПОТЕЗЫ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО СТРУЙНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ВОДЫ, ПОДАВАЕМОЙ ЧЕРЕЗ ЩЕЛЕВУЮ НАСАДКУ НА ЛОПАСТИ ГРЕБНОГО ВИНТА

А.С. Шаратов, инженер – механик 1 категории

В статье анализируется возможность повышения эффективности гребного винта, как одного из основных направлений совершенствования главной энергетической установки. Требования конвенции МАРПОЛ-73 с поправками и необходимость адаптации главной энергетической установки под изменяющиеся условия эксплуатации требуют совершенствования конструкции гребного винта фиксированного шага. В статье изложены результаты исследования обтекания профиля лопасти гребного винта, с подачей дополнительной воды вдоль хорды, касательно засасывающей поверхности. Данная работа является адаптацией применяемой в авиации метода повышения подъемной силы путем сдува пограничного слоя и реактивного закрылка. Величина подъемной силы оказывает существенное влияние на гидродинамические характеристики гребного винта. Выполнено численное моделирование профиля лопасти гребного винта в сжимаемой и несжимаемой средах, а также расчет параметров профиля NACA-0012 с подачей дополнительной воды. Результаты моделирования подтверждены путем сравнения с известными результатами моделирования для сжимаемых сред и экспериментальными данными. Доказана возможность повышения эффективности гребного винта за счет струйной подачи дополнительной воды на подсосывающую поверхность лопасти вдоль хорды. Результаты работы могут быть использованы с целью управления режимом работы главного двигателя, путем изменения упора и гидродинамического момента сопротивления вращению гребного винта.

Ключевые слова: главная энергетическая установка, винт, лопасть, профиль, струйное воздействие, численное моделирование.

The article analyzes the possibility of increasing the efficiency of the propeller as one of the main directions of improving the main power plant. The requirements of the MARPOL-73 Convention as amended and the need to adapt the main power plant to changing operating conditions require improvement of the fixed-pitch propeller design. The article presents the results of the study of the flow profile of the propeller blade, with the supply of additional water along the chord, concerning the suction surface. This work is an adaptation of the method used in aviation to increase lift by blowing the boundary layer and the jet flap. The magnitude of the lift has a significant impact on the hydrodynamic characteristics of the propeller. The numerical simulation of the propeller blade profile in compressible and incompressible media is performed, as well as the calculation of the parameters of the profile NACA-0012 with additional water supply. The simulation results are confirmed by comparison with known simulation results for compressible media and experimental data. The possibility of increasing the efficiency of the propeller due to the jet supply of additional water to the suction surface of the blade along the chord is proved. The results of the work can be in order to control the mode of operation of the main engine, by changing the stop and the hydrodynamic moment of resistance to the rotation of the propeller.

Keywords: main propulsion, propeller, the blade, the profile of the jet impact, numerical simulation

Введение

Ужесточение требований конвенции МАРПОЛ по предотвращению загрязнения окружающей среды с морских судов, ввод требований конструктивного коэффициента энергетической эффективности (ККЭЭ) на морских судах требуют внедрения новых технологий, позволяющих повысить эффективность использования топлива в судовых энергетических установках (СЭУ). Если проанализировать процесс преобра-

зования энергии в главной энергетической установке (ГЭУ) судна, то можно выделить два основных компонента, влияющих на экономичность – двигатель и гребной винт [1]. В частном случае работы главного двигателя (ГД) на винт фиксированного шага, параметры двигателя напрямую зависят от гидродинамического совершенства гребного винта. Следовательно, путем совершенствования гребного винта (ГВ) [2] можно наиболее качественно повысить эффек-

тивность эксплуатации ГЭУ, а также обеспечить оптимальный режим работы главного двигателя по показателям тепловой и механической напряженности.

В течение рейса, условия эксплуатации судна и режим работы ГЭУ может существенно изменяться. Это приводит к изменению режима работы ГЭУ, снижению КПД ее элементов, изменению ККЭЭ [3]. Характеристики ГЭУ, работающей на гребной винт фиксированного шага, могут быть изменены регулировкой главного двигателя [4. – с. 152] или корректировкой конструкции гребного винта [5]. Оба метода достаточно трудоемки и требуют значительных капитальных вложений.

На основании вышеизложенного можно сформировать запрос практики – создание гребного винта, который можно адаптировать под конкретные условия эксплуатации судна с обеспечением максимального КПД ГЭУ, без значи-

тельных затрат и/или постановки судна в док. Максимальный КПД ГЭУ достигается путем оптимизации режима работы главного двигателя и КПД гребного винта фиксированного шага, для обеспечения требуемой скорости судна.

Современные гребные винты фиксированного шага (рис. 1) представляют собой цельную конструкцию. Лопасти гребного винта имеют соответствующую профилировку. Эффективность гребных винтов, в связи с особенностями конструкции и принципом действия, зависит от четырех видов потерь [6. – С. 94]. При исследованиях работы гребных винтов и их проектировании используются различные методы повышения их эффективности, направленные на снижение одного или нескольких видов потерь. Основными направлениями, реализующимися на практике, являются – выбор оптимального профиля лопасти и пассивное управление обтекающим потоком [7, 8].



Рисунок 1 – Профилирование лопастей гребного винта фиксированного шага

Все эти методы являются пассивными (необратимыми) в процессе эксплуатации. При этом в литературе недостаточное внимание уделяется активным (регулируемым) методам повышения КПД гребного винта. Пример такого метода – струйное воздействие дополнительной жидкости, подаваемой на подсасывающую поверхность лопасти гребного винта в районе входной кромки [9]. Подразумеваемая возможность целенаправленного воздействия на различные виды потерь, свойственных гребному винту, сформирована гипотеза, требующая своего подтверждения.

Основная гипотеза: дополнительная подача воды на подсасывающую поверхность лопасти гребного винта в районе входной кромки позволяет обеспечить изменение параметров потока жидкости, обтекающей поверхность. Это позволяет, в зависимости от параметров подаваемой воды [10], изменять характер взаимодей-

ствие лопасти с водой. За счет этого достигается возможность изменять гидродинамические параметры гребного винта (такие как крутящий момент, потребляемая мощность, КПД) независимо от частоты вращения и условий эксплуатации. Путем изменения потребляемой мощности и гидродинамического момента сопротивления вращению обеспечивается требуемый теплотехнический режим работы главного двигателя без перегрузки.

Цель работы – проверка гипотезы дополнительного струйного воздействия воды, подаваемой на подсасывающую поверхность вдоль хорды лопасти винта путем численного моделирования и расчетного обоснования взаимодействия профиля лопасти с обтекающим потоком. Оценка взаимодействия осуществляется по параметрам, характеризующим профиль – величине подъемной силы и профильного сопротивления.

1. Концепция дополнительного струйного воздействия жидкости, подаваемой на лопасти гребного винта

Дополнительная подача воды на подсосывающую поверхность лопасти гребного винта в районе входной кромки является аналогом используемого в авиации метода увеличения подъемной силы – струйной механизации. Принцип действия струйной механизации крыла основан на использовании дополнительных источников энергии для реализации основных задач:

- предотвращение отрыва пограничного слоя на поверхности крыла;
- увеличение циркуляции скорости потока вокруг крыла (эффект суперциркуляции), реализуемой путем дополнительного разгона (или торможения) потока и, соответственно, уменьшения (или увеличения) давления на отдельных участках крыла с целью получения приращения подъемной силы;
- ламинаризация потока, обтекающего крыло.

Струйная механизации в авиации реализована следующими способами.

Системы управления пограничным слоем [11, 12, 13], основанные на применении отсоса пограничного слоя и его сдува, обеспечивают безотрывное обтекание профиля при больших углах атаки крыла и больших углах отклонения закрылков без существенных затрат энергии. Струйный закрылок увеличивает подъемную силу крыла главным образом за счёт эффекта суперциркуляции и вертикальной составляющей реакции струи. Значение коэффициента подъемной силы на крыле со струйным закрылком зависит от отбора выхлопных газов от реактивного двигателя. При использовании практически всего объема выхлопных газов двигателя, может быть обеспечено значительное повышение подъемной силы крыла.

Действие эжекторных систем повышения эффективности крыла, основано на увеличении импульса первичной струи сжатого воздуха на выходе из камеры смешения, образованной раздвижными элементами крыла, за счёт подмешивания воздуха, отсасываемого с верхней поверхности крыла. Увеличение подъемной силы происходит за счет увеличения реакции струи, ликвидации отрыва потока на поверхности крыла и отклонённых закрылках, а также за счёт суперциркуляции.

При обдуве крыла струями выхлопных газов от реактивных двигателей, увеличение подъемной силы происходит вследствие улучшения

обтекания поверхности профиля и отклонённых закрылков, обдуваемых струёй, эффекта суперциркуляции и поворота вектора тяги двигателей.

Система выдува струй вдоль размаха крыла позволяет реализовать устойчивое вихревое течение над верхней поверхностью профиля и увеличить коэффициент подъемной силы при больших углах атаки, а также повысить эффективность закрылков и органов управления при больших углах их отклонения. Эти системы отличаются конструктивной простотой и приближаются по эффективности к системам управления пограничным слоем, путём тангенциального выдува тонких струй из щелевых сопел при достаточно больших значениях импульса струи.

Исследования по различным направлениям применения струйной механизации ведутся уже довольно давно, основные результаты отражены в работах [12-15]. По результатам исследований струйную механизацию применяют для улучшения аэродинамических характеристик крыла, параметров устойчивости и управляемости, управления аэродинамическими силами и моментами, действующими на крыло. Однако, следует отметить, что недостаточное внимание уделяется возможности струйного воздействия в смежной области – гидродинамике гребных винтов. Об этом свидетельствует отсутствие публикаций по возможным направлениям исследования и использования их результатов. Отсутствует информация о возможности повышения эффективности гидродинамических параметров профилей, обтекаемых потоком жидкости.

Применение струйного воздействия воды, дополнительно подаваемой на лопасти гребного винта судна, позволяет целенаправленно воздействовать на жидкость, обтекающую винт. При этом, обеспечивается реализация различных концепций струйного воздействия: «суперкавитация», «ламинаризация пограничного слоя», «сдув пограничного слоя», «струйный закрылок», «интерцептор» и т.д. Подача дополнительной воды через щелевую насадку гребного винта (рис. 2, а) позволяет обеспечить влияние на все виды потерь, снижающих эффективность гребных винтов, тем самым реализовывая практически все способы повышения эффективности движителя.

В процессе эксплуатации системы подачи дополнительной воды на лопасти гребного винта представляется возможным изменять ее параметры, воздействуя тем самым на величины потребляемой мощности и гидродинамического момента сопротивления гребного винта. Это поз-

волит обеспечить требуемую тепловую и механическую напряженность главного двигателя.

2. Моделирование струйного течения жидкости в программном комплексе FlowVision

Подтверждение рабочей гипотезы может быть получено путем экспериментального исследования профиля в гидродинамической трубе. При этом экспериментальное исследование требует изготовления значительного числа моделей и характеризуется достаточной трудоемкостью. В связи с значительным развитием вычислительной гидродинамики [16. — С. 4] часть первоначальных исследований режимов работы профилей выполняют в САД-программах [17,18].

Для численного моделирования профиля используется разработанный в России программный комплекс FlowVision. При этом достоверность результатов обеспечена сравнением полученных результатов с теоретическими данными. Эффективность программы доказана повторяемостью экспериментов и воспроизводимостью результатов исследований профилей [19] и гребных винтов [20] проведенных авторитетными авторами.

Моделирование процесса обтекания лопасти гребного винта выполнялось в программном комплексе FlowVision 2.56 [21]. Моделирование и численное решение выполнено в плоской поста-

новке задачи для элемента лопасти - профиля. С целью сохранения тождественности результатов сопловой аппарат моделировался без изменения геометрии профиля с использованием встроенных в программный продукт средств моделирования.

Для моделирования струйного воздействия в расчетную модель вводился дополнительный фильтр, который позволял задать скорость дополнительной подаваемой воды V . За счет этого регулировалась интенсивность струйного воздействия на поток, обтекающий исследуемый профиль. Зона воздействия, имитирующая щелевую насадку, имела следующие параметры: расстояние по хорде от носка профиля $0,2b$ (b – величина хорды профиля), максимальное расстояние от поверхности профиля - один шаг расчетной сетки (h). Вектор скорости потока V , направлен параллельно хорде профиля, имеет величину в два раза больше скорости набегающего потока $V_{п}$. Толщина сопла соизмерима с размерами расчетной сетки (показана на рис. 2, б). Изменение параметров потока, эквивалентное подаче дополнительной жидкости, позволило смоделировать процесс струйного воздействия на гидродинамические параметры профиля и рассчитать их численные значения.

Использование фильтра (рис. 2, б), имитирующего сопло щелевой насадки, позволяет сохранить оригинальную форму профиля.

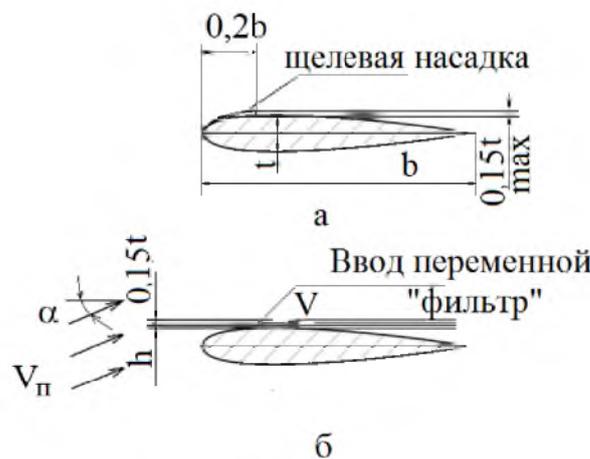


Рисунок 2 – Профиль лопасти и щелевая насадка для подачи струи воды:

а – геометрические размеры щелевой насадки профиля; б – геометрические размеры эквивалентного «фильтра» относительно расчетной сетки

3. Подтверждение рабочей гипотезы путем численного моделирования профиля NASA-0012 с дополнительным струйным воздействием жидкости.

Для проверки гипотезы струйного воздействия жидкости на профиль лопасти гребного винта используются тестовые задачи программного комплекса FlowVision. Моделирование выполняется в несжимаемой среде с использовани-

ем рекомендаций по исследованию режимов работы гребных винтов [22].

Среди многообразия аэродинамических профилей [23], можно выделить симметричный профиль NASA-0012, характеристики которого хорошо изучены, а результаты исследований имеют широкий охват в открытых источниках [24, 25]. Тестовая задача по исследованию аэро-

динамических характеристик, присутствует в программном комплексе FlowVision.

Согласно правил планирования эксперимента [26], необходима проверка предложенной фирмой TESIS модели и адекватности получаемых данных. Ряд публикаций [27,28], посвященных исследованию обтекания профиля в программном комплексе FlowVision, подтверждают актуальность и достоверность используемой математической модели и методов решения.

На первом этапе выполнено расчетное исследование профиля NASA-0012 в потоке сжимаемой среды (воздух) для различных углов набегающего потока α при неизменных начальных параметрах. Серия параметров, полученных в результате расчетного исследования, использо-

вана как исходные данные при численном моделировании струйного воздействия.

На следующем этапе, для каждого угла набегающего потока, с помощью «фильтра» (рис. 2, б) проведено расчетное исследование величин, характеризующих обтекание потоком профиля, определены значения подъемной силы профиля C_y и профильного сопротивления C_x . Критерием сходимости служили величины выводимых программой невязок, а также значения силы сопротивления и подъемной силы профиля во времени (достижение установившегося режима).

На рис. 3 показаны результаты расчетного исследования, в сравнении с известными характеристиками [29], полученными при исследовании профиля NASA-0012.

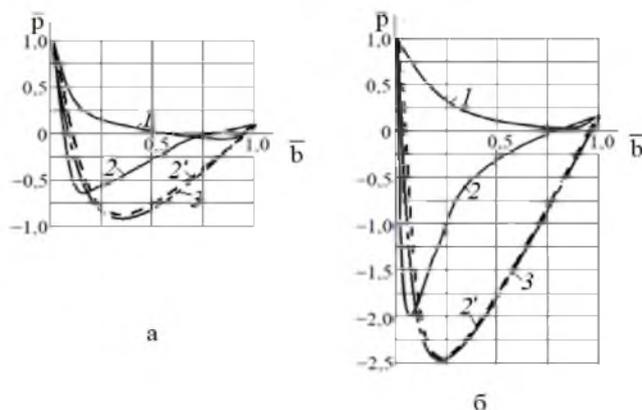


Рисунок 3 – Эпюры распределения давления p по профилю со струйным воздействием вдоль хорды b : а – для угла набегающего потока 2 градуса; б – для угла набегающего потока 12 градусов;

1 – нагнетающая поверхность; 2 – засасывающая поверхность без струи; 2' – засасывающая поверхность со струей (открытые источники); 3 – засасывающая поверхность со струей (FlowVision)

Наблюдаемое на рис. 3 подобие эпюр распределения давления расчетного исследования и известных характеристик доказывает достоверность полученных результатов. Погрешность, наблюдаемая при исследовании струйного воздействия на профиль, не превышает доверительного интервала.

На третьем этапе произведем переход от модели сжимаемой среды к несжимаемой жидкости. В теоретических исследованиях такой переход выполняется для упрощения модели и де-факто подразумевает сохранение эффекта. Так как рабочая гипотеза требует использования параметров потока, характерных для морской воды, проведем дополнительное моделирование работы профиля NASA-0012 в несжимаемой жидкости.

В пакете твердотельного моделирования создан параллелепипед (бокс), имитирующий окружающую профиль жидкость. Размеры бокса $10 \times 4 \times 1$ хорд профиля выбраны таким образом,

чтобы исключить влияние ограниченности объема на картину обтекания.

На основе созданного бокса в пакете FlowVision создан проект и выполнено численное моделирование профиля в несжимаемой жидкости. Основные параметры метода: анизотропная стенка для поверхности профиля [30] и « k - ϵ модель» турбулентности для жидкости [31].

Модель профиля лопасти помещается в расчетную область (бокс) с заданными исходными параметрами и углом атаки.

При расчетном исследовании вводились граничные условия: «вход» с заданной нормальной скоростью 5 м/с на грани бокса перед профилем; «свободный выход» – сверху, снизу и сзади профиля; «симметрия» на боковых гранях перпендикулярных плоскости лопасти; «анизотропная стенка» – для поверхности профиля.

При проведении расчёта сделаны два допущения: 1 – расчет можно считать законченным, если изменение логарифмической относи-

тельной ошибки не превышает 10^{-5} ; 2 – проверка точности вычислений выполняется уменьшением расчетной сетки в два раза [22]. Расчет выполнялся для различных углов набегающего потока α .

На рис. 4 показана величина подъемной силы профиля C_y , полученная в результате расчетного исследования.

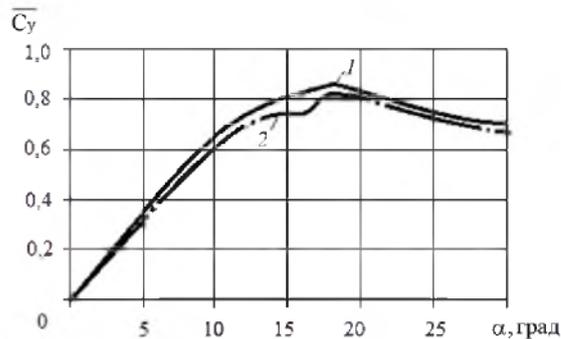


Рисунок 4 – Подъемная сила C_y профиля NASA-0012, определенная в программном комплексе FlowVision в зависимости от угла набегающего потока α : 1 - результаты экспериментальных исследований профиля стандартного профиля; 2 – результаты расчетного исследования

Наблюдаемое на рис. 4 совпадение расчетного исследования с известными данными теоретических и экспериментальных исследований профиля NASA-0012 в жидкости [25] подтверждает достоверность полученных данных. Погрешность результатов расчетного исследования при углах набегающего потока до 10° не превосходит доверительный интервал. При увеличении углов набегающего потока возрастает влияние отрыва потока, что приводит к снижению

точности при моделировании переходных процессов [32].

На заключительном этапе выполнено расчетное исследование подачи воды на подсосывающую (верхнюю) поверхность профиля NASA-0012 в условиях параллельного хорде набегающего потока (безударного натекания потока). Результаты расчета при дополнительной струйной подаче жидкости с характеристиками, аналогичными тестовому заданию, показаны на рис. 5.

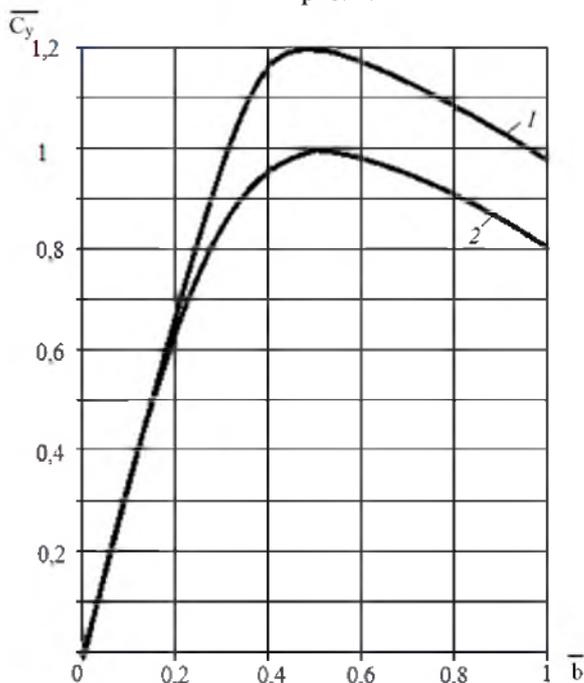


Рисунок 5 – Подъемная сила C_y моделируемого профиля NASA-0012 с подачей струйной жидкости (воды) на подсосывающую поверхность профиля вдоль хорды b : 1 – поверхность с подачей струйной жидкости, 2 – поверхность без подачи струйной жидкости

Из графиков на рис. 5 видно, что в результате струйного воздействия воды на верхнюю поверхность профиля лопасти наблюдается

ускорение потока в верхней части профиля. Это приводит к возникновению дополнительного

перепада давления на профиле и увеличению вектора подъемной силы.

Результаты моделирования и их сравнение с доступными данными позволяют утверждать, что подтвержден физический эффект струйного воздействия воды на лопасть гребного винта. Результаты расчета прошли верификацию с экспериментальными данными [33].

В справочной литературе, характерным показателем профиля, характеризующим его гидродинамическое совершенство, является коэффициент

обратного качества. Этот параметр характеризует отношение величины профильного сопротивления C_x к величине подъемной силы профиля C_y .

Выполнено расчетное исследование влияния дополнительного струйного воздействия жидкости на профиль *NACA-0012* в несжимаемой среде при различных углах набегающего потока α на профиль. Результаты расчетного исследования представлены на рис. 6.

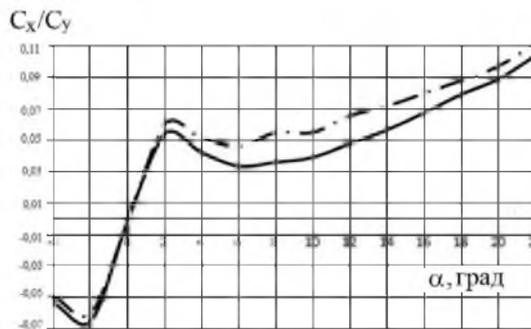


Рисунок 6 – Коэффициента обратного качества профиля лопасти (отношение C_x/C_y): штрих пунктирная линия – расчетные результаты без подачи жидкости; сплошная линия – расчетные результаты при подаче жидкости

Полученные результаты численного моделирования струйного воздействия для сжимаемой (рис. 3) и несжимаемой (рис. 5) жидкости подобны, что свидетельствует о точности проведенного расчетного исследования.

Полученные результаты моделирования струйного воздействия воды на профиль *NACA-0012* подобны результатам, полученным экспериментально при исследовании гребных винтов с аналогичным профилем в гидродинамической трубе [34].

Заключение

В результате численного моделирования и расчетного исследования подтверждена принятая в работе гипотеза. Дополнительная подача воды на подсосывающую поверхность лопасти в районе входной кромки позволяет целенаправленно изменить параметры потока жидкости, обтекающей поверхность. За счет этого улучшается коэффициент обратного качества профиля, что подтверждено результатами расчетного исследования в программном комплексе *FlowVision* при различных углах набегающего потока.

Достоверность гипотезы подтверждена подобием полученных результатов для сжимаемой и несжимаемой среды.

Результаты численного моделирования струйного воздействия воды подаваемой вдоль хорды лопасти гребного винта с профилем *NACA-0012*, проверены серией опытов в гидро-

динамической трубе.

Применение дополнительного струйного воздействия жидкости на профиль в несжимаемой среде дало относительное увеличение численного значения подъемной силы, что является закономерным эффектом увеличения плотности среды.

Численное моделирование доказало возможность повышения эффективности профиля лопасти гребного винта путем струйной подачи дополнительной воды на лопасти, что подтверждается снижением коэффициента обратного качества (рис. 6).

В зависимости от условий эксплуатации струйное воздействие дополнительной воды может быть направлено на управление такими гидродинамическими параметрами гребного винта, как упор и гидродинамический момент сопротивления вращению.

Перспективным направлением является использование полученного результата для воздействия на параметры теплонагруженности и экономичности главного двигателя, работающего на гребной винт. Это позволит в дальнейшем совершенствовать техническую эксплуатацию ГЭУ с целью улучшения показателя *ККЭЭ* [35].

Литература

1. Иванченко, А. А. Обзор опыта совершенствования конструкции и применения движительных систем в современном судостроении / А. А. Иванченко, В. А. Шишкин, В. Н. Окунев //

- Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2016. — №4 (38). – С. 156-176.
2. Carlton, J. S. Propeller Performance Characteristics In Marine Propellers and Propulsion / J. S. Carlton. – Butterworth-Heinemann: Elsevier Ltd, – 2012. — 3rd ed. – Pp. 79–136. DOI: 10.1016/B978-0-08-097123-0.00006-X.
 3. Леонов, В. Е. Исследование влияния параметров морского перехода на операционный коэффициент энергетической эффективности / В. Е. Леонов, В. В. Тимошенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. – 2018. — №2(48). – С. 390–401. DOI: 10.21821/2309–5180–2018–10–2–390–401.
 4. Шостак, В.П. Проектирование пропульсивной установки судов с прямой передачей мощности на винт: учебное пособие / В.П. Шостак, В.И. Гершаник, В.П. Кот, Н.С. Бондаренко; под ред. В.П. Шостака. – Николаев: УГМТУ, 2003. — 500 с.
 5. Маницын, В.В. Исследование режимов эксплуатации главного дизеля 5ДКРН50/110–2 танкера типа «Калининграднефть» с тремя вариантами гребных винтов / В. В. Маницын, Л. К. Капран, З. П. Старовойтова // Научные труды Дальрыбвтуза. – 2016. — С. 99-110.
 6. Антоненко, С. В. Судовые движители: учеб. пособие / С. В. Антоненко. – Владивосток: Изд-во ДВГУ, 2007. — 126 с.
 7. Shin, K. W. CFD analysis of cloud cavitation on three tip-modified propellers with systematically varied tip geometry / K. W. Shin, P. Andersen // Journal of Physics: Conference Series. – 2015. — vol. 656. – Pp. 12 – 39. DOI: 10.1088/1742–6596/656/1/012139.
 8. Sun, Yu. Experimental and numerical analyses of the hydrodynamic performance of propeller boss cap fins in a propeller–rudder system. / Yu. Sun, S. Yumin, W. Xiaoxiang, H. Haizhou // Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. – 2016. — vol. 10. – Pp. 145 –149. DOI:10.1080/19942060.2015.1121838.
 9. Пат. 46740 Украина, МПК В63П 1/00 Конструкция механизированного гребного винта / Д.И. Осовский, А.С. Шаратов; заяв. и патентообл. Керченский государственный морской технологический университет. – № 200903725; заявл. 16.04.2009; опубл. 11.01.2010, Бюл. № 1. – 4.
 10. Шаратов, А. С. Струйное воздействие на динамику гребного винта / А. С. Шаратов // Вісник двигобудування. – 2010. — вып.№2(23). – С. 82 – 85.
 11. Арнольдов, В. Н. Аэродинамические особенности струйных систем увеличения подъемной силы и анализ техники короткого взлета и посадки / В. Н. Арнольдов, Е. М. Золотко, А. Б. Стратинский // Труды ПАГИ. – 1977. — вып. 1958. – С. 41 – 44.
 12. Бушуев, В. И. Исследование на ЭВМ влияния отсоса потока и механизации крыльев на их аэродинамические характеристики. / В. И. Бушуев // Межвузовский сборник. Гидродинамика больших скоростей. – Красноярск: КПИ, 1986. — С. 125 – 136.
 13. Жулев, Ю. Г. О возможности повышения эффективности тангенциального выдува целевой струи на поверхность профиля / Ю. Г. Жулев, С. И. Иншаков // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. – 1996. — №4. – С. 182-186.
 14. Ильинский, Н. Б. Приближенный метод решения обратной краевой задачи аэрогидродинамики для крылового профиля с устройством отсоса или вдува / Н. Б. Ильинский, А. В. Поташев // Тр. VI всесоюзной научной школы «Гидродинамика больших скоростей». – Чебоксары: Чуваш, ун-т. – 1996. — С. 78-82.
 15. Li, L., Huang, G., Chen, J., Yuan, J. Numerical experiment of tip-jet ducted fans with various nozzles / L. Li, G. Huang, J. Chen, J. Yuan // 53rd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. – 2017. — Pp. 78 – 82.
 16. Аракелян, С. М. Методы вычислительной гидродинамики в расчетах движения жидкости в системах со сложной топологией: учеб пособие / С. М. Аракелян и др. – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2015. — 99 с.
 17. Ashok, P. Effect of stacking sequence on the performance of composite marine propeller / P. Ashok, P. J Kumar, P. S Prema Kumar // Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems. – 2017. — 9 (Special Issue 14). – Pp. 1823 – 1839.
 18. Nouri, N. M. Optimization of a marine contra-rotating propellers set / N. M. Nouri, S. Mohammadi, M. Zarezadeh // Ocean Engineering. – 2018. — vol. 167. –Pp. 397 – 404.
 19. Карасев, П. И. Качественное построение расчетной сетки для решения задач аэродинамики в программном комплексе FlowVision / П. И. Карасев, А. С. Шишаева, А. А. Аксенов // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. –2012. — №47 (306). – С. 46-58.
 20. Король, Ю. М. Влияние лопастных и профильных характеристик на гидродинамическую эффективность гребных винтов / Ю. М. Король, О. Н. Корнелок // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. – 2017. — №4(70). – С. 80-88.
 21. Сертификация FlowVision. [Url: http://www.tesis.com.ru/software/flowvision/](http://www.tesis.com.ru/software/flowvision/) (дата обращения 08.04.2018).
 22. Кондранин, Т. В. Применение пакетов прикладных программ при изучении курсов механики жидкости и газа: учебное пособие / Т. В. Кондранин, Б. К. Ткаченко, М. В. Березникова и др. – М.: МФТИ, 2005. — 104 с.
 23. Справочник авиационных профилей. [Url: http://kipla.kai.ru/liter/Spravochnik.pdf](http://kipla.kai.ru/liter/Spravochnik.pdf) (дата обращения 08.04.2018).

24. Vivek, S. Performance evaluation of profile modifications on straight-bladed vertical axis wind turbine by energy and Spalart Allmaras models / S. Vivek, A. K. Kaviti // *Energy*. – 2017. – Volume 126. – Pp. 766 – 795.
25. Xia, Y. The effect of corrugated skins on aerodynamic performance. / Y. Xia, O. Bilgen, M. Friswell // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. – 2014. — 25 (7). – Pp. 786 – 794.
26. Король, Ю. М. FLOWVISION в учебном процессе и компьютерных исследованиях / Ю. М. Король // 36. науч.прац НУК. – Миколаїв: НУК, 2010. — № 5 (434). – С. 19 – 26.
27. Бобарика И. О. Повышение адекватности численного моделирования аэродинамики элементов летательных аппаратов потоком несжимаемой жидкости при малых числах Маха / И. О. Бобарика, И. Н. Гусев // *Вестник ИрГТУ*. – 2014. — №2 (85) – С. 33–38.
28. Численное моделирование обтекания крыла конечного размаха с аэродинамическим профилем НАСА–2406 потоком несжимаемой жидкости при малых числах Маха. Url: <http://www.digitalmarine.net/builder/d2.pdf> (дата обращения 08.04.2018).
29. Петров, А. В. Энергетические методы увеличения подъемной силы крыла: монография / А. В. Петров. – М.: Физматлит, 2011. – 402 с.
30. FlowVision, версия 2.54 / Руководство пользователя. – М.: ООО ТЕСИС, 2008. – 284 с.
31. Аксенов, А. А. К вопросу применения модели турбулентности k-ε FlowVision для исследования обтекания профиля крыла при малых числах Рейнольдса / А. А. Аксенов, С. В. Жлуктов, С. В. Калашников, А. Л. Митин // *Инженерные системы – 2017. Труды Международного форума*. – 2017. — С. 82–89.
32. Брыляков, А. П. Отрыв потока на прямом крыле при повышенной внешней турбулентности / А. П. Брыляков, Г. М. Жаркова, Б. Ю. Занин, В. Н. Коврижина, Д. С. Сбоев // *Ученые записки ЦАГИ*. – 2004. — №1–2 (том 35). – С. 57–63.
33. Осовский, Д. И. Управление гидродинамическими характеристиками гребных винтов / Д. И. Осовский, А. С. Шаратов // *Рыбное хозяйство Украины*. – 2007. — №3 (50). – С. 25–28.
34. Осовский, Д. И. Исследование гидродинамических характеристик гребного винта, оборудованного струйной механизацией в гидродинамической трубе / Д. И. Осовский, А. С. Шаратов // *Рыбное хозяйство Украины: научно-производственный журнал*. – 2007. — №6 – С. 37–38.
35. Международная Конвенция по предотвращению загрязнения с судов (МАРПОЛ–73/78). – СПб.: АО «ЦНИИМФ», 2017. – Кн. III. – 412 с.
1. Ivanchenko, A. A. Obzor opyta sovershenstvovaniya konstrukcii i primeneniya dvi-zhitel'nyh sistem v sovremennom sudostroenii / A. A. Ivanchenko, V. A. Shishkin, V. N. Okunev // *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova*. – 2016. — №4 (38). – S. 156 – 176.
2. Carlton, J. S. Propeller Performance Characteristics In Marine Propellers and Propulsion / J. S. Carlton. – Butterworth-Heinemann: Elsevier Ltd, – 2012. — 3rd ed. – Pp. 79–136. DOI: 10.1016/B978-0-08-097123-0.00006-X.
3. Leonov, V. E. Issledovanie vlijaniya parametrov morskogo perehoda na operacion-nuy kojefficient jenergeticheskoj jeffektivnosti / V. E. Leonov, V. V. Timoshenko // *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*. – 2018. — №2(48). – С. 390–401. DOI: 10.21821/2309–5180–2018–10–2–390–401.
4. Shostak, V.P. Proektirovanie propul'sivnoj ustanovki sudov s prjamoj peredachej moshhnosti na vint: Uchebnoe posobie / V.P. Shostak, V.I. Gershanik, V.P. Kot, N.S. Bonda-renko; pod red. V.P. Shostaka. – Nikolaev: UGMTU, 2003. — 500 s.
5. Manicyn, V. V. Issledovanie rezhimov jekspluatacii glavnogo dizelja 5dkm50/110–2 tankera tipa «Kalinogradneft'» s tremja variantami grebnyh vintov / V. V. Manicyn, L. K. Kapran, Z. P. Starovojtova // *Nauchnye trudy Dal'rybvтуza*. – 2016. — С. 99 – 110.
6. Antonenko, S. V. Sudovy dvizhiteli: ucheb. posobie / S. V. Antonenko. – Vladivo-stok: Izd-vo DVGТУ, 2007. — 126 s.
7. Shin, K. W. CFD analysis of cloud cavitation on three tip-modified propellers with systematically varied tip geometry / K. W. Shin, P. Andersen // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2015. — vol. 656. – Pp. 12 – 39. DOI: 10.1088/1742–6596/656/1/012139.
8. Sun, Yu. Experimental and numerical analyses of the hydrodynamic performance of pro-peller boss cap fins in a propeller–rudder system. / Yu. Sun, S. Yumin, W. Xiaoxiang, H. Haizhou // *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. – 2016. — vol. 10. – Pp. 145 –149. DOI:10.1080/19942060.2015.1121838.
9. Pat. 46740 Ukraina, MPK B63H 1/00 Konstrukcija mehanizirovannogo grebnogo vinta / D.I. Osovskij, A.S. Sharatov; zajav. i patentoobl. Kerchenskij gosudarstvennyj morskoy tehnologicheskij universitet. – № 200903725; zajavl. 16.04.2009; opubl. 11.01.2010, Bjul. № 1.– 4.
10. Sharatov, A. S. Strujnoe vozdejstvie na dinamiku grebnogo vinta / A. S. Sharatov // *Visnik dvigunobuduvannja*. – 2010. — vyp.№2(23). – S. 82 – 85.
11. Arnol'dov, V. N. Ajerodinamicheskie osobennosti strujnyh sistem uvelichenija pod'emnoj sily i analiz tehniki korotkogo vzleta i posadki / V. N. Arnol'dov, E. M. Zolot'ko, A. B. Stratin'skij // *Trudy CAGI*. – 1977. — vyp. 1958. – S. 41 – 44.
12. Bushuev, V. I. Issledovanie na JeVM vlijaniya otsosa potoka i mehanizacii kryl'-ev na ih ajerodinamicheskie harakteristiki. / V. I. Bushuev // *Mezhvuzovskij sbornik. Gidrodinamika bol'shikh skorostej*. – Krasnojarsk: KPI, 1986. — S. 125 – 136.

References

13. Zhulev, Ju. G. O vozmozhnosti povysheniya jeffektivnosti tangencial'nogo vyduva shhelevoj strui na poverhnost' profilja / Ju. G. Zhulev, S. I. Inshakov // *Izv. RAN. Meha-nika zhidkosti i gaza*. – 1996. — №4. – S. 182 – 186.
14. Il'inskij, N. B. Priblizhennyj metod reshenija obratnoj kraevoj zadachi ajerogidrodinamiki dlja krylovogo profilja s ustrojstvom otsosa ili vduva / N. B. Il'inskij, A. V. Potashev // *Tr. VI vsesojuznoj nauchnoj shkoly «Gidrodinamika bol'shih skorostej»*. – Cheboksary: Chuvash, un-t. – 1996. — S. 78 – 82.
15. Li, L., Huang, G., Chen, J., Yuan, J. Numerical experiment of tip-jet ducted fans with various nozzles / L. Li, G. Huang, J. Chen, J. Yuan // *53rd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*. – 2017. — Pp. 78 – 82.
16. Arakeljan, S. M. Metody vychislitel'noj gidrodinamiki v raschetah dvizhenija zhidkosti v sistemah so slozhnoj topologiej: ucheb posobie / S. M. Arakeljan i dr. – Vla-dimir: Izd-vo VIGU, 2015. — 99s.
17. Ashok, P. Effect of stacking sequence on the performance of composite marine propeller / P. Ashok, P. J Kumar, P. S Prema Kumar // *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*. – 2017. — 9 (Special Issue 14). – Pp. 1823 – 1839.
18. Nouri, N. M. Optimization of a marine contra-rotating propellers set / N. M. Nouri, S. Mohammadi, M. Zarezadeh // *Ocean Engineering*. – 2018. — vol. 167. –Pp. 397 – 404.
19. Karasev, P. I. Kachestvennoe postroenie raschetnoj setki dlja reshenija zadach ajero-dinamiki v programmnom komplekse FlowVision / P. I. Karasev, A. S. Shishaeva, A. A. Aksenov // *Vestnik JuUrGU. Serija: Vychislitel'naja matematika i informatika*. – 2012. — №47 (306). – S. 46 – 58.
20. Korol', Ju. M. Vlijanie lopastnyh i profil'nyh karakteristik na gidrodinami-cheskuju jeffektivnost' grebnyh vintov / Ju. M. Korol', O. N. Korneljuk // *Nauka i progress transporta. Vestnik Dnepropetrovskogo nacional'nogo universiteta zheleznodo-rozhnogo transporta*. – 2017. — №4(70). – S. 80 – 88.
21. Sertifikacija FlowVision. [Url:http://www.thesis.com.ru/software/flowvision/](http://www.thesis.com.ru/software/flowvision/) (data ob-rashhenija 08.04.2018).
22. Kondranin, T. V. Primenenie paketov prikladnyh programm pri izuchenii kursov mehaniki zhidkosti i gaza: Uchebnoe posobie / T. V. Kondranin, B. K. Tkachenko, M. V. Bereznikova. i dr. – M.:MFTI, 2005. — 104 s.
23. Spravochnik aviacionnyh profilej. [Url: http://kipla.kai.ru/liter/Spravochnic.pdf](http://kipla.kai.ru/liter/Spravochnic.pdf) (data obrashhenija 08.04.2018).
24. Vivek, S. Performance evaluation of profile modifications on straight-bladed vertical axis wind turbine by energy and Spalart Allmaras models / S. Vivek, A. K. Kaviti // *Energy*. – 2017. – Volume 126. – Pp. 766 – 795.
25. Xia, Y. The effect of corrugated skins on aerodynamic performance. / Y. Xia, O. Bilgen, M. Friswell // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. –2014. — 25 (7). – Pp. 786 – 794.
26. Korol', Ju. M. FLOWVISION v uchebnom processe i komp'juternyh issledovanijah / Ju. M. Korol' // *Zb. nauk.prac' NUK*. – Mikolaiv: NUK, 2010. — № 5 (434). – S. 19 – 26.
27. Bobarika I. O. Povyszenie adekvatnosti chislenno modelirovanija ajerodinamiki jelementov letatel'nyh apparatov potokom neszhimaemoj zhidkosti pri malyh chislah Maha / I. O. Bobarika, I. N. Gusev // *Vestnik IrGTU*. – 2014. — №2 (85) – S. 33–38.
28. Chislennoe modelirovanie obtekanija kryla konechnogo razmaha s ajerodinamicheskim profilem NACA–2406 potokom neszhimaemoj zhidkosti pri malyh chislah Maha. [Url: http://www.digitalmarine.net/builder/d2.pdf](http://www.digitalmarine.net/builder/d2.pdf) (data obrashhenija 08.04.2018).
29. Petrov, A. V. Jenergeticheskie metody uvelichenija pod'emnoj sily kryla: [mono-grafija] / A. V. Petrov. – Moskva: Fizmatlit, 2011. – 402 s.
30. FlowVision, versija 2.54 / Rukovodstvo pol'zovatelja. – M.: OOO TESIS, 2008. – 284 s.
31. Aksenov, A. A. K voprosu primenenija modeli turbulentnosti k-ε FlowVision dlja issledovanija obtekanija profilja kryla pri malyh chislah Rejno'dsa /A. A. Aksenov, S. V. Zhluktov, S. V. Kalashnikov, A. L. Mitin // *Inzhenerye sistemy* – 2017. *Trudy Mezhdunarodnogo foruma*. – 2017. — S. 82–89.
32. Bryljakov, A. P. Otryv potoka na prjamom kryle pri povyshennoj vneshnej turbulentsnosti / A. P. Bryljakov, G. M. Zharkova, B. Ju. Zanin, V. N. Kovrizhina, D. S. Sboev // *Uchenye zapiski CAGI*. – 2004. — №1–2 (tom 35). – S. 57–63.
33. Osovskij, D. I. Upravlenie gidrodinamicheskimi karakteristikami grebnyh vintov / D. I. Osovskij, A. S. Sharatov // *Rybnoe hozjajstvo Ukrainy*. – 2007. — №3 (50). – S. 25–28.
34. Osovskij, D. I. Issledovanie gidrodinamicheskikh karakteristik grebnogo vinta, oborudovannogo strujnoj mehanizaciej v gidrodinamicheskoj trube / D. I. Osovskij, A. S. Sharatov // *Rybnoe hozjajstvo Ukrainy: nauchno-proizvodstvennyj zhurnal*. – 2007. — №6 – S. 37–38.
35. Mezhdunarodnaja Konvencija po predotvrashheniju zagrjaznenija s sudov (MARPOL–73/78). – SPb.: AO «CNIIMF», 2017. – Kn. III. – 412 s.