

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-4-402-33-40
УДК 629.5.035.55

Л.И. Вишнеvский^{1, 2} , А.Р. Тогуняц³

¹ ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

³ АО «Научно-производственное предприятие «Морская техника», Санкт-Петербург, Россия

МНОГОРЕЖИМНЫЙ ВИНТ ИЗМЕНЯЕМОГО ШАГА И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЕГО РАБОТЫ В СОСТАВЕ СООСНЫХ ГРЕБНЫХ ВИНТОВ ПРОТИВОПОЛОЖНОГО ВРАЩЕНИЯ

Объект и цель научной работы. Рассмотрены возможности использования многорежимного винта изменяемого шага (МВИШ) в составе соосных движителей противоположного вращения. В работе приводятся сравнительные расчетные данные об эффективности таких движителей по сравнению с одиночными винтами фиксированного шага (ВФШ). Приводится схема проектировочного расчета соосных движителей по диаграммам гидродинамических испытаний одиночных ВФШ и их гидродинамический расчет. На основании расчетных данных показано, что МВИШ при увеличенных нагрузках на них могут существенно повышать КПД соосного движителя. Также продемонстрировано, что последние движители имеют более высокие значения КПД, составленные из одиночных ВФШ. Приведенные результаты могут быть полезными при проектировании судов различных назначений.

Материалы и методы. Используются экспериментальные данные гидродинамических характеристик одиночных ВФШ и приводятся расчетные схемы проектировочного и гидродинамического расчета соосных движителей.

Основные результаты. Полученные данные могут быть использованы для оценки эффективности использования соосных движителей для проектируемого судна.

Заключение. Показано, что МВИШ по сравнению с ВФШ повышает эффективность соосного движителя в целом при увеличенных на него нагрузках.

Ключевые слова: многорежимный винт изменяемого шага, режим работы с увеличенной и умеренной нагрузкой на движитель, КПД движителя.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-4-402-33-40
UDC 629.5.035.55

L.I. Vishnevskij^{1, 2} , A.R. Togunjac³

¹ Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

² St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

³ Science industrial enterprise *Marine Technique*, St. Petersburg, Russia

MULTI-MODE ADAPTIVE-PITCH PROPELLER AND ITS EFFICIENCY IN COAXIAL CONTRA-ROTATING PROPELLER SYSTEMS

Object and purpose of research. This paper discusses possible applications of multi-mode adaptive-pitch propeller in coaxial contra-rotating propeller systems. The study compares efficiency calculation results for these propellers and their conventional FPP counterparts. The authors also give a design calculation layout for coaxial propellers as per hydrodynamic test diagrams for solitary FPPs, as well as demonstrate their hydrodynamic calculation. Calculation results confirm that multi-mode adaptive-pitch propellers may considerably increase the efficiency of a coaxial propeller system in high-load conditions. The study also demonstrates that coaxial propeller systems have greater efficiency also when they are made up by solitary FPPs. These results might be useful in practical design of various ships.

Для цитирования: Вишнеvский Л.И., Тогуняц А.Р. Многорежимный винт изменяемого шага и эффективность его работы в составе соосных гребных винтов противоположного вращения. Труды Крыловского государственного научного центра. 2022; 4(402): 33–40.

For citations: Vishnevskij L.I., Togunjac A.R. Multi-mode adaptive-pitch propeller and its efficiency in coaxial contra-rotating propeller systems. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2022; 4(402): 33–40 (in Russian).

Materials and methods. The study relies on hydrodynamic test data for solitary FPPs and gives layouts for design and verification calculations of coaxial propeller systems.

Main results. These data could be used to estimate the efficiency of coaxial propulsion for given ship design.

Conclusion. The study shows that multi-mode adaptive pitch propeller tend to increase overall efficiency of coaxial propeller systems in high-load conditions as compared to FPPs.

Keywords: multi-mode adaptive-pitch propeller, high-load conditions, moderate-load conditions, propulsion efficiency.

The authors declare no conflicts of interest.

Введение

Introduction

Ранее, в работах [1, 2], указывалось на особенности многорежимных винтов изменяемого шага (МВИШ), у которых в отличие от винтов регулируемого шага (ВРШ) положение лопастей на ступице регулируется не силовым приводом, а в результате действия гидродинамических и инерционных сил.

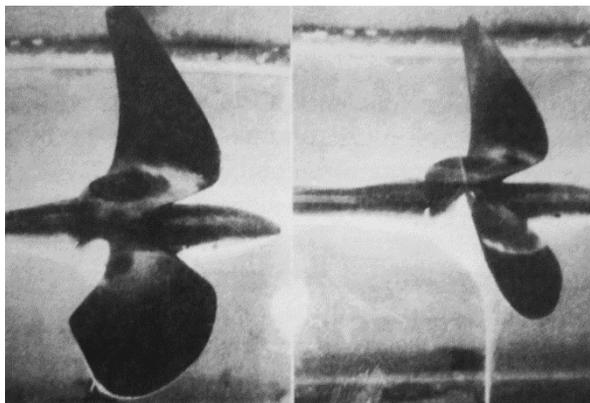


Рис. 1. Модель многорежимного винта изменяемого шага в кавитационной трубе при испытании на различных режимах

Fig. 1. A model of multi-mode adaptive-pitch propeller at the cavitation tunnel during the tests in various conditions

Предварительные расчетные оценки, в частности, показали, что они могут быть достаточно перспективными двигателями для судов с различными режимами движения: во время волнения моря, при работе на форсированных ходах, при изменении сопротивления судна вследствие обрастания корпуса и др.

Получены гидродинамические характеристики таких двигателей на моделях в условиях испытаний в кавитационной трубе (рис. 1).

Результаты таких испытаний представлены на рис. 2. Видно, что они отличаются от соответствующих характеристик ВФШ прежде всего тем, что коэффициент упора имеет существенно большую протяженность по относительной поступи. Также следует отметить, что максимальные значения КПД имеют меньшие значения по сравнению с теми же значениями, но относящимися к фиксированным лопастям на ступице, вместе с тем достаточно высокие их значения сохраняются в широком диапазоне относительных поступей. Этот же факт подтверждается при сопоставлении их с другими гребными винтами (ГВ) с неподвижными лопастями, представленными на рис. 3. Заметим, что коэффициент нагрузки по упору C_T и коэффициент нагрузки по мощности C_N связаны соотношением

$$C_N = C_T / \eta,$$

где η – КПД двигателя.

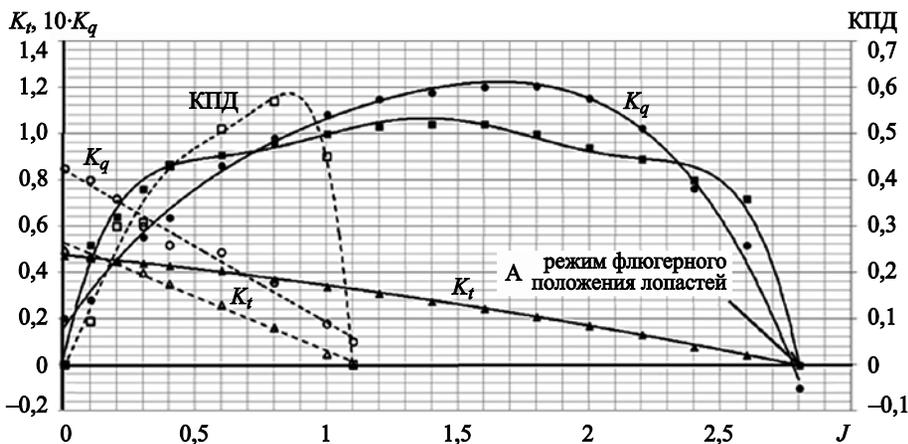


Рис. 2. Гидродинамические характеристики многорежимного винта изменяемого шага

Fig. 2. Hydrodynamic parameters of multi-mode adaptive-pitch propeller

--- лопасти застопорены в конструктивном положении
 — лопасти свободно закреплены на ступице

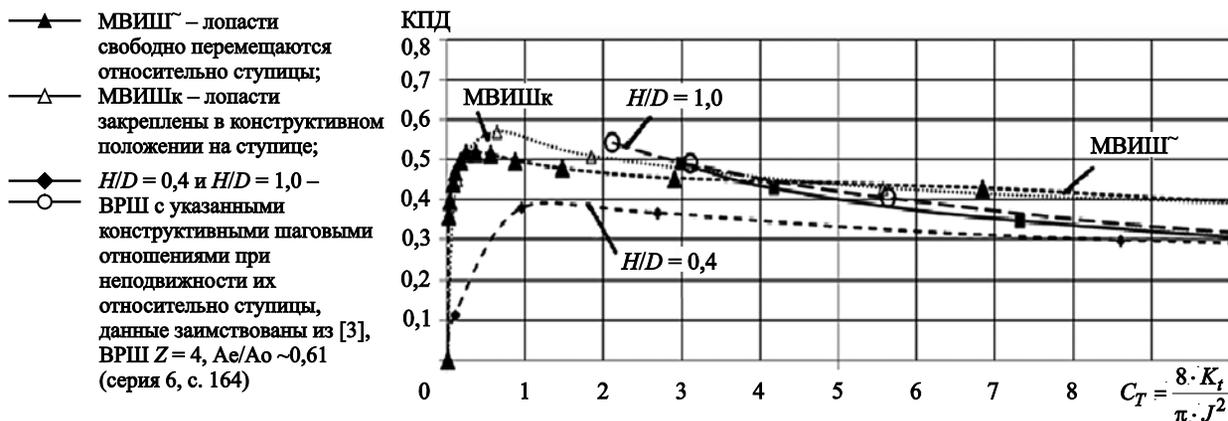


Рис. 3. Изменение эффективности (КПД) движителей в зависимости от коэффициента нагрузки C_T
Fig. 3. Propulsion efficiency versus load factor C_T

Это побудило авторов более подробно рассмотреть вопрос, связанный с использованием MVIШ при работе в составе соосных движителей, у которых задний винт в зависимости от нагрузки переднего винта, находясь в потоке вызванных от него скоростей, может находиться в изменяющихся в широком диапазоне условиях, где ВФШ может работать с достаточно низким КПД. Вместе с тем соосные движители благодаря высокой эффективности широко распространены на ряде образцов морской техники (рис. 4).

Также вследствие высокой эффективности соосным движителям было уделено значительное внимание в работах [4, 7–9].

Проектирование соосных движителей по экспериментальным данным одиночных винтов фиксированного шага и их гидродинамический расчет

Design of coaxial propulsors as per the test data for single FPPs and their hydrodynamic calculation

Проектирование и гидродинамический расчет соосных ВФШ, а также соосных ВФШ и MVIШ противоположных вращений основан на определении относительных поступей, определяющих рабочие режимы каждого из движителей, входящих в состав движительного комплекса. В отличие от [5] здесь для нахождения вызванных скоростей с целью определения относительных поступей принимались определенные допущения. Так, действие ВФШ и MVIШ заменялось действием элемента, расположенного на относительном радиусе $0,65-0,75R$,

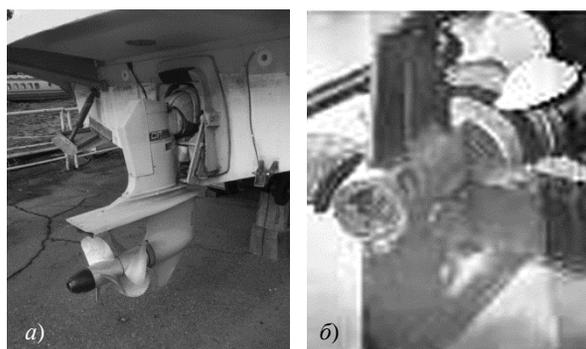


Рис. 4. Использование соосных движителей на быстроходном катере (а) и подводном аппарате (б)
Fig. 4. Application of coaxial propulsion for a fast boat (а) and a submersible (b)

а вызванные скорости от движителей, работающих в составе комплекса, определялись из следующих зависимостей:

$$\frac{V_p}{V_a} = (1 + C_T)^{1/2} - 1, \quad (1)$$

$$(V_p + V_a)V_a = \left(\omega \cdot r - \frac{V_t}{2} \right) V_t, \quad (2)$$

где V_p , V_a , V_t – скорость набегающего на движитель потока, осевая вызванная скорость и тангенциальная вызванная скорость соответственно; $\omega = 2\pi n$, n – частота вращения движителя; C_T – коэффициент нагрузки по упору на движитель.

Следует отметить, что формула (1) [6] отражает связь с нагрузкой движителя, а формула (2) [6] отражает связь осевой и тангенциальной скоростей

для бесконечно лопастного ГВ, которая справедлива при любом законе распределения циркуляции, если отвлечься от влияния центробежных сил и сжатия струи. Как видно из (1) и (2), неизвестные скорости V_a и V_t могут быть определены из этих уравнений для любых рабочих режимов работы движителей при упомянутых выше допущениях.

Опуская промежуточные выкладки, приведем окончательные для определения относительных поступей, соответствующих рабочим режимам первого и второго движителя в составе движительно-го соосного комплекса.

$$J_1 = J_p Q_{21}$$

$$\text{где } Q_{21} = \frac{1 + k_{21}(1 + C_{T2})^{1/2}}{1 + \left[1 - k_{21} \left(\frac{J_p}{\pi k_3} \right)^2 C_{T2} \right]^{1/2}}; \quad (3)$$

$$J_2 = J_p Q_{12},$$

$$\text{где } Q_{12} = \frac{1 + k_{12}(1 + C_{T1})^{1/2}}{1 + \left[1 - k_{12} \left(\frac{J_p}{\pi k_3} \right)^2 C_{T1} \right]^{1/2}}. \quad (4)$$

Здесь J_1, J_2 – рабочие поступи переднего и заднего движителя соответственно; J_p – рабочая поступь движительно-го комплекса в целом; C_{T1}, C_{T2} – коэффициенты нагрузки на передний (первый) и задний (второй) движители, входящие в состав комплекса; k_{12}, k_{21} – коэффициенты влияния переднего движителя на задний и заднего на передний движитель соответственно.

Ниже их значения приняты как $k_{12} = 0,8$ и $k_{21} = 0,3$ (что было определено на основе экспериментальных данных о распределении осевых скоростей по оси ГВ [10]), $k_3 = 0,7$ – относительный радиус эквивалентного сечения, по которому определялось действие движителя.

С учетом приведенных выражений (3) и (4) проектировочный расчет выполняется по выбранной серии результатов систематических испытаний гребных винтов следующим образом. Из заданных условий по значению J_p на начальном этапе выбирается передний ВФШ без учета работы заднего движителя, т.е. полагается $C_{T2} = 0$ и определяется шаговое отношение H/D_1 первого движителя. Затем вычисляются его коэффициент нагрузки C_{T1} , относительная поступь J_2 второго винта (4) и его шаговое отношение H/D_2 , а также коэффициент нагрузки C_{T2} . Затем расчет повторяется для первого винта с учетом найден-

ных данных от второго винта и т.д. Обычно, как показали проведенные расчеты, хватает двух-трех приближений. По найденным данным определяются шаговые отношения движителей, входящих в состав комплекса из проектных условий и с геометрией использованной серии ВФШ.

Гидродинамический расчет проводится для выбранных шаговых отношений движителей также методом последовательных приближений с единственным отличием: шаговые отношения движителей не выбираются в ходе приближений, а используются найденные значения в ходе проектировочного расчета.

Проведение исследовательских расчетов и их результаты

Research calculations and their results

При проведении расчетов были исследованы четыре комплекта соосных движителей противоположного вращения: два комплекта, состоящие из соосных ВФШ+МВИШ, и два комплекта, состоящие из соосных ВФШ+ВФШ. Причем первые два комплекта движителей были спроектированы на умеренную и большую нагрузки. На такие же нагрузки были рассчитаны и следующие два комплекта. С целью получения сравнительных данных об эффективности движителей в ходе исследований были получены и расчетные данные одиночных ВФШ, перерабатывающие мощность той же величины, что и комплекты соосных движителей.

Расчеты были проведены со следующими данными. Соосные движители на проектном режиме перерабатывали мощность по 150 кВт на частоте вращения $n = 10 \text{ с}^{-1}$. Одиночные ВФШ на проектном режиме перерабатывали 300 кВт на той же частоте вращения. Для умеренной нагрузки считалось, что скорость набегающего потока на указанных режимах равна 5,14 м/с, а на большой нагрузке составляет 0,475 м/с. Габаритный диаметр, определяемый по переднему движителю, у соосной пары принимался равным 0,95 м, диаметры задних движителей – равными 0,94 м для ВФШ и ~0,75 м для МВИШ. В качестве данных о МВИШ использовались гидродинамические характеристики (рис. 1), полученные путем обработки его геометрии в кавитационной трубе. Кавитационные характеристики движителей при расчетах не учитывались, поскольку кавитация, как показал анализ, отсутствовала. В качестве гидродинамических характеристик одиночных винтов использовались данные серии 6 из [3], с $A_E/A_0 = 0,61, Z = 4$.

Результаты расчетов представлены на рис. 5 и 6.

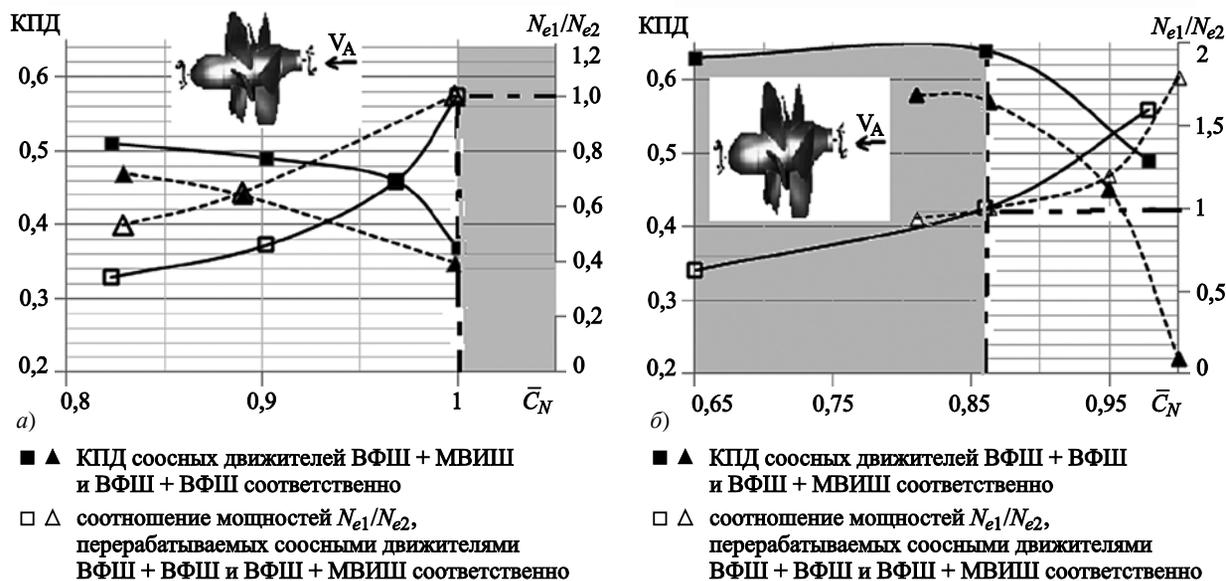


Рис. 5. Изменение КПД и соотношение мощностей N_{e1}/N_{e2} , перерабатываемых соосными движителями, в зависимости от коэффициента нагрузки по мощности C_N . Движители спроектированы на увеличенную (а) и умеренную (б) нагрузки

Fig. 5. Efficiency and N_{e1}/N_{e2} power ratio of coaxial propeller systems versus power load factor C_N . The propellers were designed to high (a) and moderate (b) loads

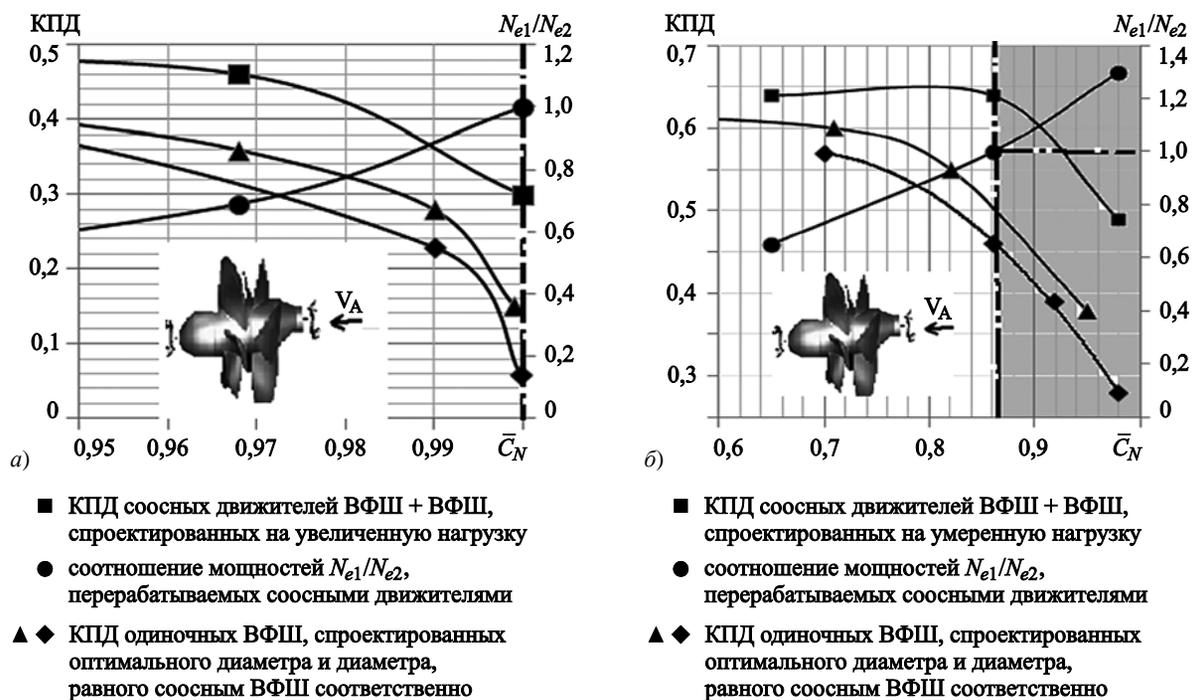


Рис. 6. Изменение КПД и соотношение мощностей N_{e1}/N_{e2} , перерабатываемых соосным движителем; изменение КПД одиночных ВФШ в зависимости от коэффициента нагрузки по мощности C_N . Движители спроектированы на увеличенную (а) и уменьшенную (б) нагрузки

Fig. 6. Efficiency and N_{e1}/N_{e2} power ratio of coaxial propeller systems in comparison with the efficiency of solitary FPPs versus power load factor C_N . The propellers were designed to high (a) and low (b) loads



Рис. 7. Изменение КПД соосного движителя ВФШ + ВФШ и отдельно входящих в него элементов. Соосный движитель спроектирован на умеренную нагрузку

Fig. 7. Efficiency of a coaxial propeller system made up by two FPPs, and of its separate elements. The system was designed to moderate loads

Из рис. 5, где показано изменение КПД соосных комплектов движителей ВФШ+МВИШ, видно, что увеличение эффективности при использовании в качестве заднего МВИШ ($D_2 = 0,75$ м) наблюдается у соосного комплекта движителей, спроектированных на увеличенную нагрузку по мощности C_N . Что касается умеренной нагрузки, то соосный комплект ВФШ+МВИШ уступает в эффективности в рассматриваемом диапазоне нагрузок. Это объясняется тем, что геометрия МВИШ все еще отработана недостаточно для того, чтобы МВИШ был эффективен во всем диапазоне нагрузок.

Вместе с тем при больших нагрузках МВИШ эффективнее, чем ВФШ (рис. 5). Этот эффект достигается тем, что вызванные скорости от переднего ВФШ достаточно велики, его КПД низок, а задний МВИШ вследствие приспособляемости обеспечивает увеличение КПД соосного комплекта в целом.

На рис. 6 представлены результаты расчета, относящиеся к соосным комплектам движителей, состоящих из ВФШ+ВФШ. Из этих результатов видно, что эти соосные движители, спроектированные на указанные выше условия, превосходят по КПД одиночные ВФШ, перерабатывающие ту же мощность. Причем этот результат справедлив как для одиночных ВФШ оптимального диаметра, так и для ВФШ диаметра, равного соосному ком-

плекту. Это объясняется тем, что в случае соосных движителей каждый из ВФШ, входящих в состав комплекта, менее нагружен, поскольку перерабатывает только часть мощности, приходящуюся на движитель в целом. В то же время одиночные движители больше нагружены, чем ВФШ, находящиеся в комплекте соосных винтов, поскольку перерабатывают полную мощность. Иными словами, при работе соосных движителей перерабатываемая ими мощность распределена в осевом направлении, а не сосредоточена в диске, как у одиночного винта.

Как видно из рис. 7, КПД заднего ВФШ выше, поскольку он работает в разгруженных условиях по сравнению с передним вследствие увеличения скорости потока от переднего винта. Что касается соотношения перерабатываемых мощностей, то на проектном режиме оно равно 1. При отклонении режима работы соосного комплекса в сторону меньших нагрузок происходит перераспределение нагрузок так, что передний движитель нагружается больше, а задний разгружается.

Заключение

Conclusion

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

Применение МВИШ может быть результативным при разработке соосных комплектов движителей противоположного вращения с целью повышения их эффективности в целом. Полученный положительный результат с целью повышения эффективности соосных движителей с использованием МВИШ относится к области увеличенных нагрузок на движитель. Это сужает класс судов для его применения. При дальнейшем совершенствовании геометрии МВИШ этот недостаток, надо полагать, будет устранен.

Что касается соосных движителей, состоящих из ВФШ, то их эффективность существенно выше по сравнению с одиночными винтами, даже если они спроектированы оптимальными на выбранные условия при прочих равных условиях. Если принять во внимание ограничения движителя по диаметру из условий размещения на конкретном судне, то эффективность использования соосных винтов может еще больше возрасти. В приведенном расчетном случае это увеличение в повышении КПД составляет около 15%. Это связано с тем, что в случае соосных движителей имеет ме-

сто распределение мощности в осевом направлении, а не переработка ее в сосредоточенном месте, как это имеет место у одиночного ВФШ при прочих равных условиях.

Дальнейшие исследования соосных движителей с использованием МВИШ следует продолжить с целью определения влияния отдельных параметров на движитель. Например, для получения данных о влиянии на соотношение перерабатываемых мощностей между первым и вторым движителем, их взаимного расположения в осевом направлении.

Список использованной литературы

1. Вишневецкий Л.И. Многорежимный винт изменяемого шага и перспективы его использования на судах с различными режимами движения // Труды Крыловского гос. науч. центра. 2021. № 4(398). С. 53–60. DOI 10.24937/2542-2324-2021-4-398-53-60.
2. Вишневецкий Л.И., Тогуныц А.Р. Корабельные лопастные движители: новые технические решения, результаты исследования. Санкт-Петербург : Судостроение, 2012. 250, [1] с.
3. ОСТ В5.0322-81. Винты гребные регулируемого шага. Методика проектирования и гидродинамического расчета по диаграммам систематических модельных испытаний.
4. Пустошный А.В. Проблемы ходкости транспортных судов. Санкт-Петербург : Крыловский гос. науч. центр, 2016. 142 с.
5. Яковлев А.Ю. Проектно-расчетный расчет лопастных систем путем прямой оптимизации // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2008. Вып. 35(319). С. 111–121.
6. Русецкий А.А., Жученко М.М., Дубровин О.В. Судовые движители. Ленинград : Судостроение, 1971. 286 с.
7. Morgan W.B. The design of counterrotating propellers using Lerb's theory // SNAME Transactions. 1960. Vol. 68. P. 6–38.
8. Manen J.D. van, Oosterveld M.W.C. Model tests on contra-rotating propellers // International Shipbuilding Progress. 1968. Vol. 15, No. 172. P. 401–417. DOI: 10.3233/ISP-1968-1517201.
9. Турбал В.К. Применение движителей новых типов на морских транспортных судах // Проблемы прикладной гидромеханики судна : [Сборник статей]. Ленинград : Судостроение, 1975. С. 208–226.
10. Басин А.М., Минювич И.Я. Теория и расчет гребных винтов. Ленинград, 1963. С. 45.

References

1. Vishnevsky L. Multi-mode adaptive-pitch propeller and its application prospects for ships with variable running conditions // Transactions of Krylov State Research Centre. 2021. No. 4(398). P. 53–60 (in Russian).
2. Vishnevsky L., Togunyats A. Marine propellers: new design solutions and research results. St. Petersburg : Sudostroyeniye, 2012. 250, [1] p. (in Russian).
3. Industrial Standard B5.0322-81. Adaptive-pitch propellers. Procedure of design and hydrodynamic calculation as per diagrams of systematic model tests (in Russian).
4. Pustoshny A. Propulsion performance of cargo carriers. St. Petersburg : Krylov State Research Centre, 2016. 142 p. (in Russian).
5. Yakovlev A. Design calculation of blade systems through direct optimization // Transactions of Krylov State Research Centre. 2008. Vol. 35(320). P. 111–121 (in Russian).
6. Rusetsky A., Zhuchenko M., Dubrovin O. Marine propulsors. Leningrad : Sudostroyeniye, 1971. 288 p. (in Russian).
7. Morgan W.B. The design of counterrotating propellers using Lerb's theory // SNAME Transactions. 1960. Vol. 68. P. 6–38.
8. Manen J.D. van, Oosterveld M.W.C. Model tests on contra-rotating propellers // International Shipbuilding Progress. 1968. Vol. 15, No. 172. P. 401–417. DOI: 10.3233/ISP-1968-1517201.
9. Turbal V. Application of new propulsors for sea-going carrier ships // Challenges in applied marine hydrodynamics: Collection of papers. Leningrad : Sudostroyeniye, 1975. P. 208–226 (in Russian).
10. Basin A., Miniovich I. Theory and calculation of propellers. Leningrad : Sudpromgiz, 1963. 760 p. (in Russian).

Сведения об авторах

Вишневецкий Леонид Иосифович, д.т.н., профессор кафедры гидроаэромеханики и морской акустики (ГАММА) Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 386-69-20. E-mail: krylov@krylov.spb.ru. <https://orcid.org/0000-0001-7427-3632>.

Тогуныц Анатолий Радиславович, к.т.н., инженер АО «Научно-производственное предприятие «Морская техника». Адрес: 198184, Россия, Санкт-Петербург, Канонерский остров, д. 41. Тел.: +7 (812) 327-28-02. E-mail: spb_morteh@mail.ru.

About the authors

Leonid I. Vishnevskij, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of Hydroaeromechanics and Marine Acoustics (GAMMA), St. Petersburg State Marine Technical University. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 386-69-20. E-mail: krylov@krylov.spb.ru. <https://orcid.org/0000-0001-7427-3632>.

Anatolii R. Togunjac, Cand. Sci. (Eng.), Engineer, Science industrial enterprise Marine Technique. Address: 41, Cannonerskii Island, St. Petersburg, Russia, post code 198184. Tel.: +7 (812) 327-28-02. E-mail: spb_morteh@mail.ru.

Поступила / Received: 26.05.22

Принята в печать / Accepted: 28.09.22

© Вишневский Л.И., Тогуниц А.Р., 2022