

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-4-386-50-55
УДК 629.5.053.001.24

А.Ю. Яковлев¹, О.П. Орлов¹, А.Ш. Ачкинадзе², И.К. Бородай¹, А.А. Родионов²

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

² ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», Санкт-Петербург, Россия

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖИТЕЛЕЙ С ГРЕБНЫМИ ВИНТАМИ-ТАНДЕМ В НАСАДКЕ

Объект и цель научной работы. Объектом исследования являются характеристики движителя типа гребные винты-тандем в насадке. Цель работы состоит в разработке метода расчета характеристик движителей данного типа и расчетном исследовании зависимости этих характеристик от расположения гребных винтов-тандем в насадке.

Материалы и методы. Разработанный расчетный метод основан на предшествующих разработках авторов статьи. Алгоритм расчета представляет собой итерационный процесс, на каждом шаге которого выполняется последовательный расчет работы переднего и заднего гребных винтов и обтекания насадки потоком, создаваемым гребными винтами. Для расчета работы гребных винтов используется метод несущей поверхности. Для расчета обтекания насадки – метод граничных интегральных уравнений (BEM).

Основные результаты. Разработан метод поверочного расчета гребных винтов-тандем в насадке. С его помощью проведены исследования влияния расположения гребных винтов на характеристики движителя. Также показан сложный нестационарный характер пульсаций давления на поверхности насадки.

Заключение. Теоретическая ценность исследования состоит в выявлении характерных особенностей поведения пульсаций давления на поверхности насадки при работе в ней гребных винтов-тандем, а также в установлении особенностей влияния взаиморасположения лопастей гребных винтов-тандем в насадке на их характеристики. Разработанный расчетный метод позволяет проводить оценку характеристик движителей типа гребные винты-тандем в насадке на этапе их предварительного проектирования.

Ключевые слова: гребные винты-тандем, насадка, расчет, давление.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-4-386-50-55
UDC 629.5.053.001.24

A. Yakovlev¹, O. Orlov¹, A. Achkinadze², I. Boroday¹, A. Rodionov²

¹ Krylov State Research Center, St. Petersburg, Russia

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

NUMERICAL STUDIES OF PROPULSORS WITH NOZZLED TANDEM PROPELLERS

Object and purpose of research. This paper studies nozzled tandem propellers. The purpose of the research is to develop calculation method for performance parameters of these propellers, as well as to analytically investigate how these parameters depend on arrangement of propellers in tandem propulsors.

Materials and methods. Calculation method developed in this study is based on previous researches of the authors. It implements an iterative algorithm, where forward and aft propeller operation, as well as propeller wake flow around the nozzles, are calculated at each step. Propeller operation is calculated as per bearing-surface method. Flow calculations for the nozzle are performed as per the method of boundary integral equations (BEM method).

Для цитирования: Яковлев А.Ю., Орлов О.П., Ачкинадзе А.Ш., Бородай И.К., Родионов А.А. Численное исследование движителей с гребными винтами-тандем в насадке. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; 386(4): 50–55.

For citations: Yakovlev A., Orlov O., Achkinadze A., Boroday I., Rodionov A. Numerical studies of propulsors with nozzled tandem propellers. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; 386(4): 50–55 (in Russian).

Main results. Development of verification calculation method for nozzled tandem propellers. This method was used to study the effect of propeller locations upon performance of propulsor. The paper also demonstrates complex and unsteady nature of pressure pulses on nozzle surface.

Conclusion. Theoretical value of this study is that it identifies typical peculiarities of pressure pulsing on nozzle surface due to tandem propeller operation, as well as identifies how exactly blade arrangement of nozzled tandem propellers influences their performance parameters. This calculation method enables performance assessment of nozzled tandem propellers at early stages of their design.

Keywords: tandem propellers, nozzle, calculation, pressure.

Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

Введение

Introduction

Современные движительные комплексы имеют различную компоновку и могут включать в себя несколько вращающихся лопастных систем. Примером подобной конфигурации движителя служит тандемное расположение гребных винтов (ГВ). ГВ-тандем называются соосные ГВ, вращающиеся в одном направлении и с одинаковой угловой скоростью. Последние два условия служат основным отличием ГВ-тандем от общего случая соосной пары.

ГВ-тандем наиболее часто используются в тех случаях, когда необходимо получить большую нагрузку на ГВ и одновременно обеспечить хорошие кавитационные качества. Использование тандемной работы ГВ по сравнению с ГВ противоположного вращения обусловлено требованиями простоты конструкции. Реализация противоположного вращения ГВ на одной оси требует специальных технических решений и, соответственно, ведет к росту стоимости движителя. В то же время соосные ГВ имеют более высокий КПД по сравнению с ГВ-тандем, что и определяет ограниченное применение тандемной схемы ГВ на практике. Тем не менее, ГВ-тандем остаются «в обойме» проектантов и их исследования и совершенствование ведутся постоянно, хотя и с меньшим размахом, чем для соосных ГВ.

Анализ исследований гребных винтов-тандем

Analysis of tandem propeller studies

Тандемное расположение ГВ использовалось с начала эпохи лопастных движителей, однако большинство специалистов указывают на работу [1] как на первое научно обоснованное применение данного типа движителей в качестве основного движителя судна. Таким образом, целенаправленные комплексные исследования ГВ-тандем

ведутся начиная с середины XX века. Не останавливаясь на многочисленных работах, выполненных в XX веке, отметим только ряд последних публикаций по этой тематике.

Здесь можно выделить два направления исследований: совершенствование методов расчета и проектирования ГВ-тандем и развитие новых типов движителей на их основе. Первое направление отражает последовательное развитие численных методов гидромеханики – от метода несущей линии (который и сейчас используется для проектирования движителей [2]) и несущей поверхности [3], к методам ВЕМ в невязкой жидкости [4] и расчету работы ГВ-тандем в CFD-пакетах [5]. Второе направление представлено исследованиями ГВ-тандем с регулируемым шагом [6] и ГВ-тандем в насадке [7].

Именно анализу особенностей работы ГВ-тандем в насадке и трубе и посвящена данная работа. На рис. 1 в качестве примера приведено изображение движительного комплекса с ГВ-тандем в насадке. Описание метода его расчета и основных особенностей работы представлено далее.

Метод расчета, используемый для численного исследования

Calculation method used in the numerical study

При исследовании и разработке ГВ-тандем в насадке применяются два комплекса численных методов, представленные ниже. С одной стороны, для расчета стационарных характеристик тандемных

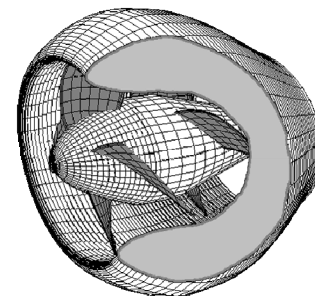


Рис. 1. Пример движительного комплекса с гребным винтом-тандем в насадке

Fig. 1. Example of a propulsor system with nozzled tandem propeller



Рис. 2. Схема расчета тандемного движителя

Fig. 2. Flow chart of tandem propulsor calculation

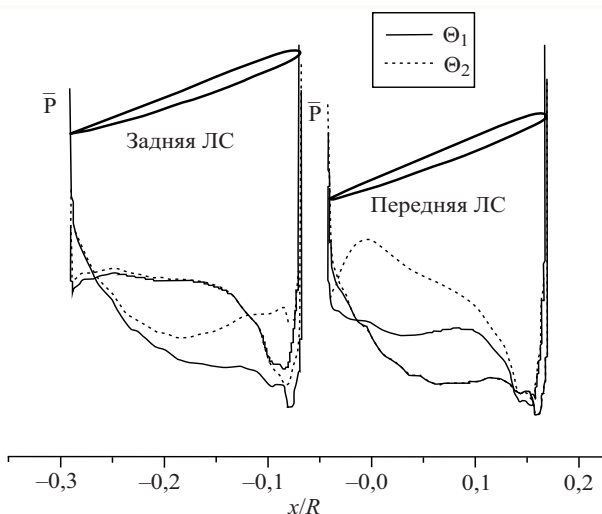


Рис. 3. Распределение давления на лопастях тандемного движителя при двух угловых положениях лопастей θ_1 и θ_2 (цилиндрическое сечение на относительном радиусе $\bar{r} = 0,7$)

Fig. 3. Pressure distribution on tandem propulsor blades for two angular positions of blades, θ_1 and θ_2 . (cylindrical section at relative radius $\bar{r} = 0,7$)

лопастных систем, работающих в трубе или в длинном канале, могут с успехом применяться методы расчета на базе теории плоских решеток [8, 9].

С другой стороны, для расчета ГВ в насадке необходимо применять трехмерные расчетные модели. В данном случае используется модель на базе теории несущей поверхности [10] – для расчета ГВ и для учета обтекания неподвижных элементов и возникающих на них стационарных и нестационарных сил применяется метод типа ВЕМ [11]. Расчеты по этим методам входят отдельными шагами в итерационную схему [12] (рис. 2), в рамках которой первоначально определяются параметры течения в однородном потоке. Второй этап позволяет учесть неоднородность потока. На каждом этапе задача решается последовательными итерациями. Данный итерационный процесс достаточно быстро сходится и требует не более 5–7 итераций на первом этапе и 2–3 итераций – на втором.

Важным этапом расчета движительного комплекса является оценка нестационарных сил и моментов, действующих на ГВ и неподвижные элементы движителя. Возникновение пульсаций сил и моментов на ГВ-тандем и насадке обусловлено неоднородностью потока, набегавшего на лопасти, и по своей сути мало отличается от аналогичного явления для традиционного ГВ. В то же время для ГВ-тандем характерны свои особенности пульсаций сил и моментов, связанные с перераспределением пульсирующих нагрузок между парой ГВ, образующих тандем. Для оценки переменных сил и моментов на переднем и заднем ГВ, а также на неподвижных осесимметричных элементах, разработан специальный метод расчета на базе теории несущей поверхности, развивающий подходы, использованные в [13].

Результаты исследований Results

В результате исследований, проведенных с помощью комплекса разработанных расчетных методов, были получены следующие результаты:

- Установлено, что характеристики тандемного движителя зависят от взаимного расположения переднего и заднего ГВ. Разнесение ГВ вдоль оси вращения приводит к быстрому уменьшению воздействия заднего ГВ на передний. Обратное влияние передней ступени на заднюю проявляется при больших расстояниях между

ГВ, что объясняется взаимодействием лопастей заднего ГВ с вихревыми пеленами и следами, сходящими с лопастей переднего ГВ.

- Помимо продольного расстояния между ГВ, воздействие на характеристики движителя-тандем оказывает угол поворота заднего ГВ по отношению к переднему. Пример зависимости распределения коэффициента давления на лопастях передней и задней ступеней от угла между лопастями первой и второй ступеней приведен на рис. 3. Как следует из рисунка, распределение давления существенно изменяется при варьировании этого угла. Как показали расчеты, существует возможность выбора наиболее подходящего с точки зрения тех или иных характеристик расположения ГВ в продольном направлении и по углу поворота.
- При работе ГВ-тандем в замкнутом канале, например, в насадке или трубе, каждая лопастная система вносит свой вклад в распределение давления на поверхности канала (рис. 4). За каждой лопастью заметна область следа. Из рисунка видно, что давление в диске заднего ГВ повышено по сравнению с передним ГВ, что соответствует теоретическим положениям.

Результаты, входящие в первый и второй пункты, были известны ранее для открытых ГВ-тандем, и в данном случае была подтверждена правильность этих представлений и в случае с ГВ-тандем в насадке. Что касается воздействия лопастных систем на насадку или трубу, то распределения давления на поверхности насадки показывают их существенную неоднородность (рис. 4).

Заключение

Conclusion

Таким образом, можно сделать следующие выводы по результатам работы:

1. Отечественные и зарубежные исследователи продолжают уделять внимание ГВ-тандем. Причем развивается ряд новых вариантов этих движителей, в том числе ГВ-тандем в насадке.
2. Отечественные разработки численных методов позволяют проводить исследования различных вариантов движителей на основе ГВ-тандем. В частности, показана возможность оценки характеристик ГВ-тандем в насадке.
3. Продемонстрирована возможность варьирования и оптимизации характеристик движителя

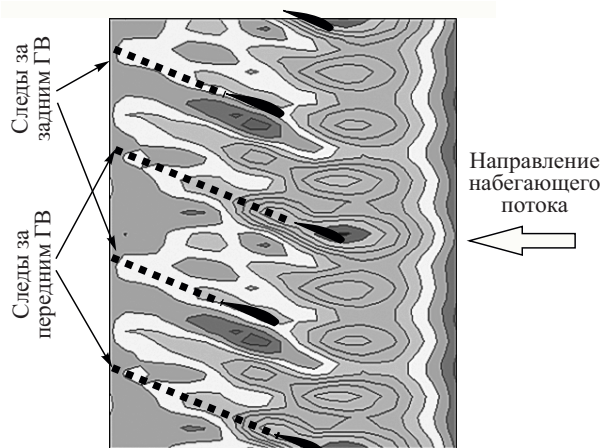


Рис. 4. Распределение давления на внутренней поверхности насадки (представленной в виде развертки на плоскость) при работе в ней гребного винта-тандем

Fig. 4. Pressure distribution on the internal surface of the nozzle (shown in unfolded form) with tandem propeller operating in it

с ГВ-тандем за счет смещения лопастных систем в продольном и окружном направлениях.

4. Установлено, что взаимодействие ГВ-тандем с насадкой имеет сложный нестационарный характер, что выражается в существенно неоднородном распределении скоростей и давлений на поверхности насадки.

Библиографический список

1. Hadler, J. B., Morgan, W.B. and Meyers, K.A. Advanced propeller propulsion for highpowered single-screw ships // Transaction of SNAME. 1964. P. 231–293.
2. Ullah M.R. A Theoretical method for the design of marine tandem propellers // Proceedings of MARTEC 2010. The International Conference on Marine Technology. 11–12 December 2010, BUET, Dhaka, Bangladesh.
3. Koronowicz T., Krzemianowski Z., Tuszkowska T., Szantyr J.A. A complete design of tandem co-rotating propellers using the new computer system // Polish maritime research 4(67). 2010. Vol. 17. P. 17–25. 10.2478/v10012-010-0031-2.
4. Ачкинадзе А.Ш., Красильников В.И., Степанов И.Э. «SPA-2000» – программа поверочного расчета гребного винта в неравномерном поле скоростей усовершенствованным панельным методом // Тезисы докладов XL Крыловских чтений. 2001. С. 63–65.
5. Yu X. The research on the hydrodynamic performance of tandem propellers based on CFD methods. Master thesis, Global thesis. Posted on: 2015-01-31, GTID: 2272330467984642.

6. Яковлева Н.Д. Экспериментальное исследование влияния взаимного расположения пар лопастей друг относительно друга на гидродинамические и кавитационные характеристики ВРШ «тандем» // Труды Крыловского государственного научного центра. 2015. Вып. 88 (372). С. 117–124.
7. Chen Y.J. Open water performance study with tandem propellers in nozzle based on CFD method. Master thesis, Global thesis. Posted on: 2016-11-27, GTID: 2272330464971508.
8. Васильев А.В., Яковлев А.Ю. Расчетный метод оценки гидродинамических характеристик осевых насосов // Тезисы докладов XL Крыловских чтений. 2001.
9. Маринич Н.В. Проектирование водометных движителей с двухступенчатой лопастью системой // Труды Крыловского государственного научного центра. 2017. Вып. 3(381). С. 43–49.
10. Мухина Л.А. Гидродинамический расчет гребного винта на персональном компьютере // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 1998. Вып. 7(291). С.30–32.
11. Бушковский В.А., Яковлев А.Ю. Метод граничных элементов для расчета обтекания тел, имеющих осевую симметрию // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2008. Вып. 36(321). С. 187–200.
12. Яковлев А.Ю. Создание системы расчетных методов для проектирования новых типов движительных комплексов современных судов. Дисс. на соиск. учен. степ. док. техн. наук. СПб., 2007.
13. Бушковский В.А., Яковлев А.Ю. Расчетное определение гидродинамических характеристик движительного комплекса «винт в насадке» // II Международная конференция по судостроению (ISC'98). 1998. Т. В.
5. Yu X. The research on the hydrodynamic performance of tandem propellers based on CFD methods. Master thesis, Global thesis. Posted on: 2015-01-31, GTID: 2272330467984642.
6. Yakovleva N. Assessing the effect of mutual positions of blade couples upon hydrodynamic and cavitation parameters of a tandem CPP // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2015. Issue 88(372). P. 117–124 (in Russian).
7. Chen Y.J. Open water performance study with tandem propellers in nozzle based on CFD method. Master thesis, Global thesis. Posted on: 2016-11-27, GTID: 2272330464971508.
8. Vasilyev A., Yakovlev A. Calculation method for hydrodynamic load assessment of axial pumps // XLth Krylov Readings. Theses of messages. 2001. (in Russian).
9. Marinich N. Design of waterjets with two-staged blade system // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2017. Issue 3(381). P. 43–49 (in Russian).
10. Mukhina L. Hydrodynamic propeller calculation on PC // Transactions of the Krylov State Research Centre. 1998. Issue 7(291). P. 30–32 (in Russian).
11. Bushkovsky V., Yakovlev A. Boundary-element method in flow calculations of axially symmetric bodies // Transactions of KSRI. 2008. Issue 36(321). P. 187–200 (in Russian).
12. Yakovlev A. Development of a system of calculation methods to design innovative propulsion systems for modern ships. Doctoral Theses. St. Petersburg, 2007 (in Russian).
13. Bushkovsky V., Yakovlev A. Hydrodynamic calculations of nozzled propellers // International Shipbuilding Conference ISC-98. Vol. B. (in Russian).

References

1. Hadler J.B., Morgan W.B., Meyers K.A. Advanced propeller propulsion for highpowered single-screw ships // Transaction of SNAME. 1964. P. 231–293.
2. Ullah M.R. A Theoretical method for the design of marine tandem propellers // Proceedings of MARTEC 2010. The International Conference on Marine Technology. 11–12 December 2010, BUET, Dhaka, Bangladesh.
3. Koronowicz T., Krzemianowski Z., Tuszkowska T., Szantyr J.A. A complete design of tandem co-rotating propellers using the new computer system // Polish maritime research 4(67). 2010. Vol. 17. P. 17–25. 10.2478/v10012-010-0031-2.
4. Achkinadze A., Krasilnikov V., Stepanov I. SPA-2000 software for verification calculation of propellers in heterogeneous wake field by means of an updated panel method // XLth Krylov Readings. Theses of messages. 2001. P. 63–65 (in Russian).

Сведения об авторах

Яковлев Алексей Юрьевич, д.т.н., доцент, и.о. заведующего кафедрой гидроаэромеханики и морской акустики СПбГМТУ, заместитель начальника отделения ходкости кораблей и судов – начальник отдела управления проектами ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, г. Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: 8 (812) 386-67-35. E-mail: 10_otd@ksrc.ru.

Орлов Олег Павлович, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник сектора ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: 8 (812) 415-45-26. E-mail: krylov@krylov.spb.ru

Ачкинадзе Александр Шамильевич, д.т.н., профессор кафедры «Теория корабля и строительная механика»

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». Адрес: 190008, Россия, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3. Тел.: 8 (812) 494-09-30. E-mail: achkin@mail.ru.

Бородай Игорь Кириллович, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: 8 (812) 415-49-88. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Родионов Александр Александрович, д.т.н., заведующий кафедрой «Теория корабля и строительная механика» ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». Адрес: 190008, Россия, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3. Тел.: 8 (812) 735-85-39. E-mail: rodionovsmk@yandex.ru.

About the authors

Alexey Yu. Yakovlev, Dr. Sci. (Eng.), Associated Professor, Deputy Head of Propulsion Division – Head of Project Management Department, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia,

post code 196158. Tel.: 8 (812) 386-67-35. E-mail: 10_otd@ksrc.ru.

Oleg P. Orlov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: 8 (812) 415-45-26. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Aleksandr Sh. Achkinadze, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Ship Theory and Structural Mechanics Department, St. Petersburg State Marine Technical University, address: 3, Lotsmanskaya st., St. Petersburg, Russia, post code 190008, tel. 8 (812) 494-09-30. E-mail: achkin@mail.ru.

Igor K. Boroday, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: 8 (812) 415-49-88. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Alexandr A. Rodionov, Dr. Sci. (Eng.), Head of Ship Theory and Structural Mechanics Department, St. Petersburg State Marine Technical University. Address: 3, Lotsmanskaya st., St. Petersburg, Russia, post code 190008. Tel. 8 (812) 735-85-39. E-mail: rodionovsmk@yandex.ru.

Поступила / Received: 09.10.18
Принята в печать / Accepted: 12.11.18
© Коллектив авторов, 2018