

УДК 629.5.018.71:629.5.036+629.5.017
EDN: TIWWTZ

А.Л. Соколов¹, С.А. Александров² , Г.И. Каневский² 

¹ АО «Северное проектно-конструкторское бюро», Санкт-Петербург, Россия

² ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ХОДОВЫХ КАЧЕСТВ БЫСТРОХОДНОГО СУДНА С ГЛУБОКО ПОГРУЖЕННЫМИ ВОДОМЕТНЫМИ ДВИЖИТЕЛЯМИ НАСОСНОГО ТИПА

Объект и цель научной работы. Объектом исследования является глубоко погруженный под свободную поверхность водометный движитель насосного типа (ВДНТ). Цель – оценка ходовых качеств судна с глубоко погруженными под свободную поверхность ВДНТ.

Материалы и методы. Анализ данных модельных испытаний водометного движителя насосного типа, установленного на модели судна, расчетные методы оценки влияния корпуса судна на гидродинамические характеристики ВДНТ и ходовые качества судна.

Основные результаты. Выполнены расчеты ходовых качеств быстроходного судна с учетом влияния глубоко погруженных под свободную поверхность водометных движителей насосного типа и определены коэффициенты взаимодействия движителей с корпусом. Показана возможность движения судна задним ходом при установке глубоко погруженных ВДНТ в качестве движителей.

Закключение. Погружение ВДНТ под свободную поверхность позволяет обеспечить судну движение на заднем ходу. Применение глубоко погруженного ВДНТ не приводит к значительным потерям эффективности движителя в сравнении с частично погруженным ВДНТ.

Ключевые слова: водометный движитель насосного типа, методика расчета ходкости, задний ход.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

UDC 629.5.018.71:629.5.036+629.5.017
EDN: TIWWTZ

A.L. Sokolov¹, S.A. Alexandrov² , G.I. Kanevsky² 

¹ JSC Severnoye Design Bureau, St. Petersburg, Russia

² Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

PROPULSION PERFORMANCE OF FAST VESSEL WITH DEEPLY IMMERSSED PUMPJETS

Object and purpose of research. The object of study is a pump-jet propulsor (PJP) deeply submerged under free surface. The purpose of study is to assess the propulsion performance a vessel with deeply submerged PJP propulsors under free surface.

Materials and methods. Analysis of model tests data of pump-jet propulsor installed on a ship model, calculation methods for assessing the hull efficiency on hydrodynamic performance of PJP and ship propulsion performance.

Main results. Calculations of propulsion performance of fast vessel have been performed in terms of deeply submerged pump-jet propulsors efficiency under free surface. Propulsors-hull interaction coefficients have been determined. The vessel capability of running astern with installed deeply-submerged PJP as propulsors is shown.

Для цитирования: Соколов А.Л., Александров С.А., Каневский Г.И. Исследование ходовых качеств быстроходного судна с глубоко погруженными водометными движителями насосного типа. Труды Крыловского государственного научного центра. 2024; 3(409): 49–58.

For citations: Sokolov A.L., Alexandrov S.A., Kanevsky G.I. Propulsion performance of fast vessel with deeply immersed pumpjets. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2024; 3(409): 49–58 (in Russian).

Conclusion. Submersion of the PJP under free surface allows the vessel to move astern. The use of deeply submerged PJP does not lead to significant losses in efficiency of propulsion system in comparison with a partially submerged PJP.

Keywords: pump-jet propulsor, method of calculating propulsion performance, running astern.

The authors declare no conflicts of interest.

Введение

Introduction

Вплоть до последнего времени применение водометных движителей на судах сдерживалось их низкой эффективностью при движении на экономическом и других режимах хода, отличных от полного. Одним из направлений повышения эффективности судов является применение таких водометных движителей, которые обеспечивают заметное снижение расхода топлива по сравнению с гребными винтами на всех режимах движения судна.

Теории и расчету параметров водометных движителей посвящено значительное число публикаций в России [1, 3–5, 9–11] и за рубежом [16–19]. Среди них можно отметить работы А.Н. Папира [7], С.В. Куликова [2], А.А. Русецкого [8], М.А. Мавлюдова [6] и др. В этих работах подробно рассмотрена струйная теория водометных движителей и предложены методы определения оптимальных элементов для заданных условий проектирования.

В работе [12] описывается применение ВДНТ на быстроходном судне в случае частично погруженной установки ВДНТ. Данная схема показала отличные гидродинамические характеристики и высокую эффективность на переднем ходу, но продемонстрировала отсутствие движения судна на задний ход. В связи с этим актуальна задача обеспечения движения быстроходного судна на заднем ходу при применении ВДНТ.

Одним из способов решения данной задачи является полное погружение ВДНТ под воду, для этого

варианта выполнено исследование гидродинамических характеристик и эффективности движения судна с глубоко погруженным ВДНТ.

Буксировочные и самоходные испытания модели быстроходного судна с увеличенной осадкой

Towing and self-propulsion tests of fast vessel model with increased draft

Для оценки ходовых качеств судна с глубоко погруженными ВДНТ необходимо располагать следующими материалами:

1. буксировочное сопротивление судна с ВДНТ, глубоко погруженными под свободную поверхность;
2. гидродинамические характеристики ВДНТ в свободной воде;
3. коэффициенты взаимодействия ВДНТ с корпусом судна.

Буксировочное сопротивление судна определяется с закрытыми водоводами и не зависит от положения ВДНТ. Величина этого буксировочного сопротивления для нормального водоизмещения быстроходного судна при осадке $T_F = T_A = 4,71$ м с комплектом выступающих частей определена ранее [15]. При этом осадка изготовленной модели быстроходного судна в масштабе 1:15 н.в. составляет $T_F = T_A = 0,314$ м. Гидродинамические характеристики ВДНТ в свободной воде определены ранее и приведены в статье [13].

Таблица 1. Геометрические характеристики модели быстроходного судна при увеличенной осадке

Table 1. Geometric characteristics of fast vessel model with an increased draft

Характеристика, ед. изм.	Значение
Длина модели по ватерлинии $L_{WL M}$, м	7,830
Ширина модели наибольшая по ватерлинии B_M , м	0,953
Осадка модели на миделе T_M , м	0,380
Осадка модели в носу T_{FM} , м	0,350
Осадка модели в корме T_{AM} , м	0,410
Объемное водоизмещение ∇_M , м ³	1,603
Площадь смоченной поверхности корпуса S_M , м ²	9,856
Выступающие части	Скуловые кили, руль в диаметральной плоскости

Для определения коэффициентов взаимодействия ВДНТ с корпусом в случае их глубокого погружения решено выполнить буксировочные и самоходные испытания изготовленной и испытанной ранее модели судна при новой осадке составляющей $T_F = 0,350$ м, $T_A = 0,410$ м. При этой осадке ВДНТ оказываются полностью погруженными под свободную поверхность.

Далее приводятся результаты буксировочных испытаний модели № 11598 при указанной осадке, проведенных в глубоководном опытовом бассейне Крыловского центра на переднем ходу с полным комплектом выступающих частей с закрытыми вододами. В табл. 1 указаны геометрические характеристики модели быстроходного судна при увеличенной осадке.

Результаты испытаний в виде зависимостей коэффициента остаточного сопротивления от числа Фруда – на рис. 1.

Анализ данных, приведенных на рис. 1, показывает, что при увеличении осадки величина коэффициента остаточного сопротивления заметно возрастает.

Самоходные испытания модели быстроходного судна с увеличенной осадкой

Self-propulsion tests of fast vessel model with increased draft

Далее были проведены самоходные испытания модели быстроходного судна № 11598 с увеличенной осадкой для оценки влияния заглубления ВДНТ на коэффициенты взаимодействия ВДНТ с корпусом. Расположение модели ВДНТ на модели № 11598 приведено на рис. 2.

Самоходные испытания проводились при осадке $T_F = 0,350$ м, $T_A = 0,410$ м. На рис. 3 приведены

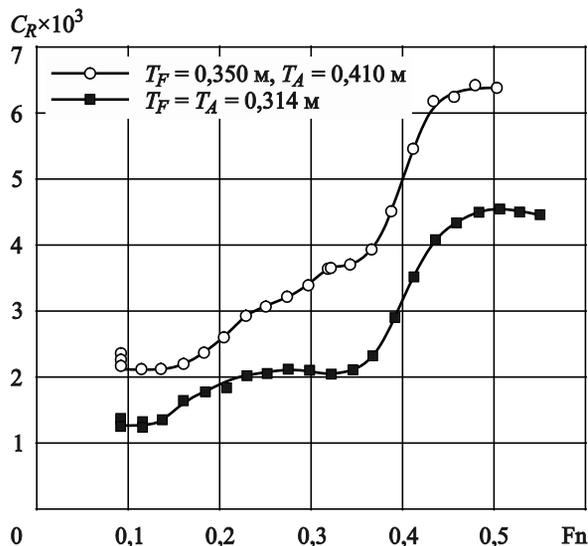


Рис. 1. Зависимость коэффициента остаточного сопротивления C_R модели № 11598 быстроходного судна от числа Фруда Fn

Fig. 1. Froude number Fn as function of residual resistance coefficient C_R – Model No. 11598

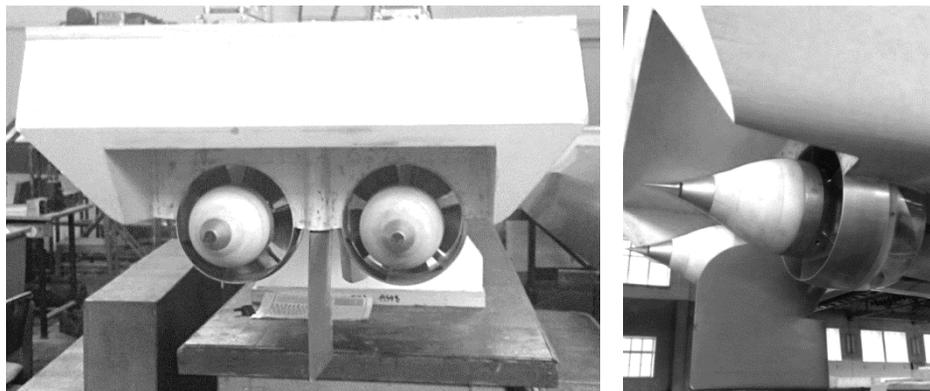
фотографии, представляющие картину волнообразования рядом с корпусом модели № 11598 с глубоко погруженными ВДНТ при скорости буксировки $V_m = 4,0$ м/с.

Анализируя материалы, представленные на рис. 3, можно отметить, что в кормовой оконечности модели наблюдаются сложные гидродинамические явления, вызванные обтеканием погруженного транца модели и формированием струй водометов. При всех скоростях движения струй от ВДНТ на свободной поверхности не наблюдается.

Результаты самоходных испытаний модели № 11598 с глубоко погруженными ВДНТ при осад-

Рис. 2. Расположение модели водометного двигателя насосного типа на модели № 11598

Fig. 2. Location of pumpjet on Model No. 11598



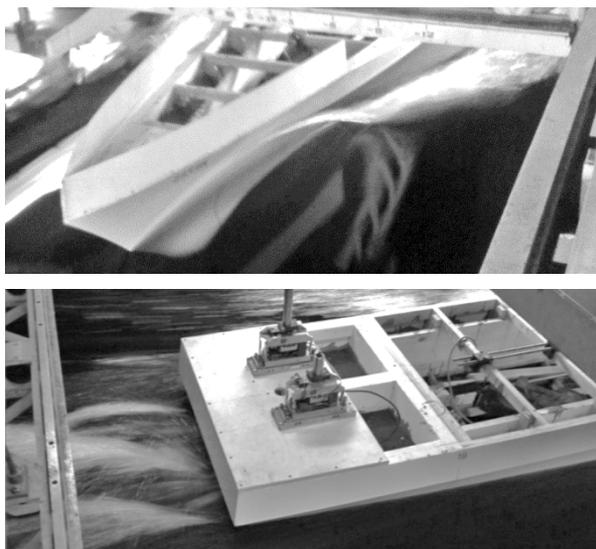


Рис. 3. Картина волнообразования рядом с корпусом модели № 11598 с глубоко погруженными водометными движителями насосного типа при самоходных испытаниях со скоростью $V_m = 4$ м/с. $T_F = 0,350$ м, $T_A = 0,410$ м

Fig. 3. Wave generation pattern in the vicinity of model hull No. 11598 with deeply immersed pumpjets during self-propulsion tests at speed $V_m = 4$ m/s. $T_F = 0.350$ m, $T_A = 0.410$ m

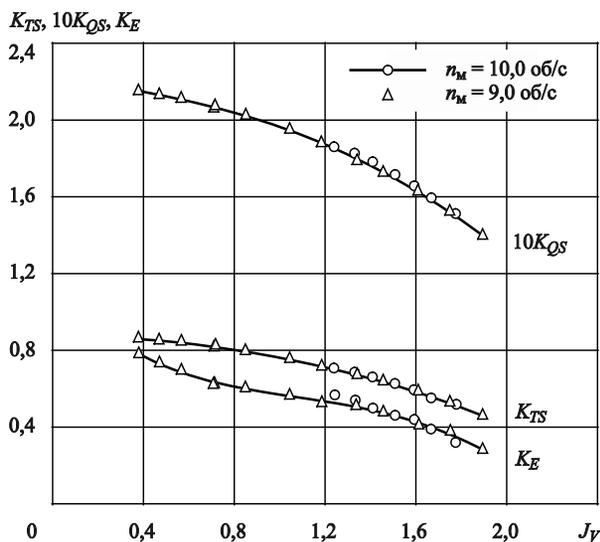


Рис. 4. Зависимость коэффициентов упора K_T , момента K_Q и коэффициента полезной тяги K_E от поступи J_v . Правый вал. Модель № 11598 с глубоко погруженными водометными движителями насосного типа. Наружное вращение. $T_F = 0,350$ м, $T_A = 0,410$ м

Fig. 4. Advance J_v as function of thrust K_T , torque K_Q and effective thrust K_E coefficients. Right shaft. Model No. 11598 with deeply submerged pump-jet propulsors. Outboard rotation. $T_F = 0.350$ m, $T_A = 0.410$ m

ке $T_F = 0,350$ м, $T_A = 0,410$ м для правого вала представлены на рис. 4.

Полученные в результате испытаний материалы показывают, что измеренные величины на правом и левом валах мало отличаются друг от друга. При определении величины коэффициента полезной тяги K_E и пропульсивного коэффициента η_D использованы средние значения по правому и левому бортам. Можно отметить, что максимальное значение пропульсивного коэффициента η_D составляет 0,67, т.е. меньше максимального КПД ВДНТ в свободной воде 0,70. Это означает, что ориентировочное значение коэффициента влияния корпуса примерно равно 0,96.

Данные, приведенные на рис. 5, показывают, что на швартовном режиме на переднем ходу коэффициент полезной тяги K_E составляет примерно 0,9, а коэффициент упора рабочего колеса – 0,83. Таким образом, на швартовах спрямляющий аппарат создает полезную тягу.

Анализируя данные рис. 5, относящиеся к работе ВДНТ на швартовах на заднем ходу (реверс), можно отметить, что просос воздуха и связанное с этим уменьшение по абсолютным значениям всех наблюдаемых величин отсутствуют.

На швартовном режиме на заднем ходу коэффициент полезной тяги K_E составляет примерно –0,3,

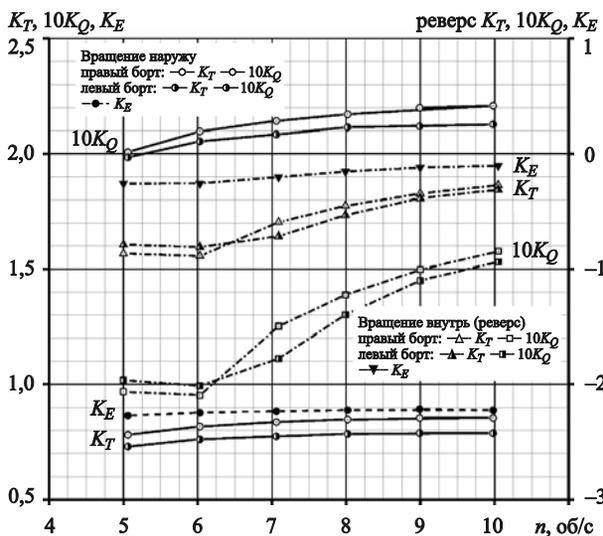


Рис. 5. Швартовные испытания модели с глубоко погруженными водометными движителями насосного типа за корпусом модели № 11598. Наружное вращение. $T_F = 0,350$ м, $T_A = 0,410$ м

Fig. 5. Bollard pull tests of model with deeply immersed pumpjets behind the hull of Model No. 11598. Outward rotation. $T_F = 0.350$ m, $T_A = 0.410$ m

а коэффициент упора рабочего колеса $-0,8$. Приведенные данные показывают, что на швартовах спрямляющий аппарат уменьшает полезную тягу.

Расчет коэффициентов взаимодействия водометного движителя насосного типа с корпусом быстроходного судна с увеличенной осадкой

Pumpjet-hull interaction coefficients for fast vessel with increased draft

Для определения коэффициентов взаимодействия сопоставлены результаты испытаний ВДНТ $D = 233$ мм в свободной воде [14] и самоходных испытаний модели № 11598 быстроходного судна с глубоко погруженными ВДНТ. Полученные зависимости приведены на рис. 6. Рабочее колесо глубоко погружено полностью под свободную поверхность воды. Осадка модели № 11598 составляет $T_F = 0,350$ м, $T_A = 0,410$ м.

Использование данных, приведенных на рис. 6, в сочетании с допущением о равенстве единице коэффициента влияния неравномерности $i_Q = 1$ позволяет получить зависимости коэффициентов взаимодействия ВДНТ с корпусом судна по схеме Тейлора для осадки $T_F = 0,350$ м, $T_A = 0,410$ м. Полученные данные приведены на рис. 7–8.

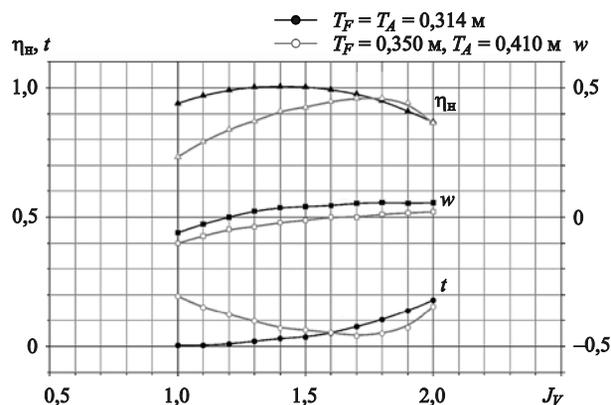


Рис. 7. Зависимости коэффициента попутного потока w_T , коэффициента засасывания t и коэффициента влияния корпуса η_H от поступи J_V . Модель № 11598 с водометными движителями насосного типа

Fig. 7. Advance J_V as function of wake fraction w_T , thrust deduction t and hull efficiency η_H . Model No. 11598 with pump-jet propulsors

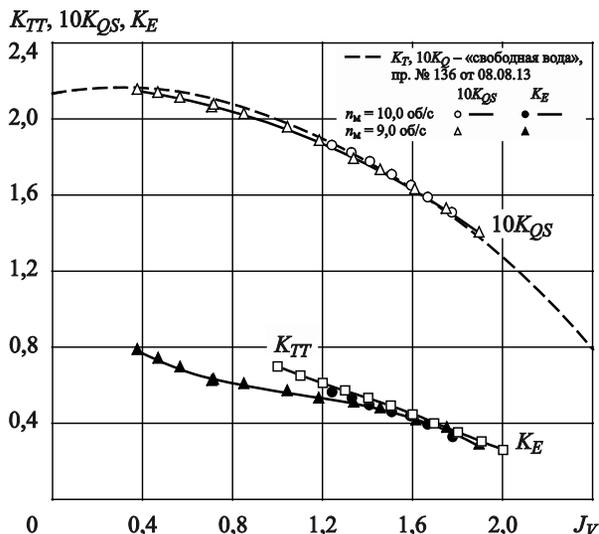


Рис. 6. Зависимости коэффициента момента рабочего колеса K_Q , коэффициента упора устройства K_{TT} , коэффициента полезной тяги K_E от поступи J_V . Осадка модели № 11598 составляет $T_F = 0,350$ м, $T_A = 0,410$ м

Fig. 6. Advance J_V as function of impeller torque coefficient K_Q , pumpjet thrust coefficient K_{TT} and effective thrust coefficient K_E . Model No. 11598. Draft $T_F = 0.350$ m, $T_A = 0.410$ m

Анализируя данные, представленные на рис. 8, можно отметить, что при заглублении ВДНТ снижается максимальное значение коэффициента влияния корпуса η_H на 4 %. Кроме того, положение

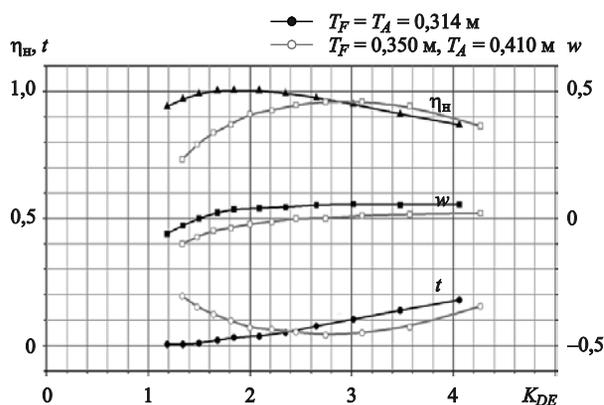


Рис. 8. Зависимости коэффициента попутного потока w_T , коэффициента засасывания t и коэффициента влияния корпуса η_H от коэффициента нагрузки K_{DE} . Модель № 11598 с водометными движителями насосного типа

Fig. 8. Load factor K_{DE} as function of wake fraction w_T , thrust deduction t and hull efficiency η_H . Model No. 11598 with pump-jet propulsors

Таблица 2. Геометрические характеристики быстроходного судна с глубоко погруженными водометными движителями насосного типа

Table 2. Geometric characteristics of fast vessel with deep-submerged pump-jet propulsors

Характеристика	Ед. изм.	Натура
Длина между перпендикулярами, L_{pp}	м	115,0
Ширина на миделе, B	м	14,2
Осадка на носовом перпендикуляре, T_F	м	4,71
Осадка на кормовом перпендикуляре, T_A	м	4,71
Осадка на мидель-шпангоуте, T_M	м	4,71
Водоизмещение, ∇	м ³	3860,4
Смоченная поверхность, S	м ²	1878,5
Длина модели по ватерлинии, L_{WL}	м	115,848
Ширина по ватерлинии, B_{WL}	м	14,407
Абсцисса центра поддержания (от мидель-шпангоута), X_c	м	-2,911
	% L_{pp}	-2,531
Площадь ватерлинии, S_{WL}	м ²	1416,5
L_{WL}/B_{WL}	–	8,042
B/T	–	3,017
C_{BWL}	–	0,491
C_M	–	0,797
C_{WP}	–	0,849

Таблица 3. Сопоставление буксировочного сопротивления R_T быстроходного судна с глубоко погруженными водометными движителями насосного типа и эталонного судна водоизмещением 3800 м³

Table 3. Correlation of towing resistance R_T of fast vessel with deeply immersed pumpjets and reference vessel with displacement of 3800 m³

V_s , уз	R_T , кН		Изменение %
	эталонное быстроходное судно	судно с ВДНТ	
14	196,7	188,8	-4,0
20	411,4	390,2	-5,2
30	1427,7	1351,7	-5,3

Таблица 4. Сопоставление пропульсивного коэффициента η_D быстроходного судна с глубоко погруженными водометными движителями насосного типа и эталонного быстроходного судна водоизмещением 3800 м³

Table 4. Correlation of propulsive coefficient η_D of fast vessel with deeply submerged pump-jet propulsors with reference fast vessel with displacement of 3800 m³

V_s , уз	η_D		Изменение %
	эталонное быстроходное судно	судно с погруженными ВДНТ	
14	0,590	0,661	12,0
20	0,589	0,660	12,0
30	0,570	0,632	10,9

максимума сдвигается направо. Наличие коэффициентов взаимодействия ВДНТ с корпусом, полученных по схеме Тейлора, является весьма полезным и позволяет использовать эти данные далее, при выполнении расчетов ходкости.

Расчет ходовых качеств быстроходного судна с глубоко погруженными водометными движителями насосного типа

Propulsion performance of fast vessel with deeply immersed pumpjets

Полученные данные по зависимости от коэффициента нагрузки коэффициентов взаимодействия глубоко погруженных ВДНТ с корпусом быстроходного судна использованы для оценки ходовых качеств. Кроме того, выполнено сопоставление результатов расчета ходкости эталонного судна [12], быстроходного судна с ВДНТ, расположенными вблизи свободной поверхности, и судна с глубоко погруженными ВДНТ.

Геометрические характеристики судна с глубоко погруженными ВДНТ приведены в табл. 2.

Полученные в результате расчетов величины буксировочного сопротивления R_T , пропульсивного коэффициента η_D и потребной мощности P_S сопоставлены с соответствующими данными для эталонного судна на рис. 9–11. Следует отметить, что здесь и в предыдущих разделах используется буксировочное сопротивление судна с закрытыми водоводами, которое не зависит от места размещения ВДНТ.

Также отметим, что полученные в результате расчетов данные по запасам на вторую стадию кавитации показывают их достаточное значение запасов по развитым кавитационным явлениям при всех скоростях хода.

Для выполнения анализа полученных результатов в табл. 3–5 сопоставлены значения буксировочного сопротивления R_T , пропульсивного коэффициента η_D и потребной мощности P_S быстроходного судна с глубоко погруженными ВДНТ и эталонного судна.

В табл. 5 приведены эффективности применения ВДНТ у свободной поверхности и глубоко погруженными под воду. Анализируя данные табл. 3–5, можно отметить, что буксировочное сопротивление R_T быстроходного судна с ВДНТ меньше эталонного в пределах от 4 до 5%. Полученное уменьшение величины буксировочного сопротив-

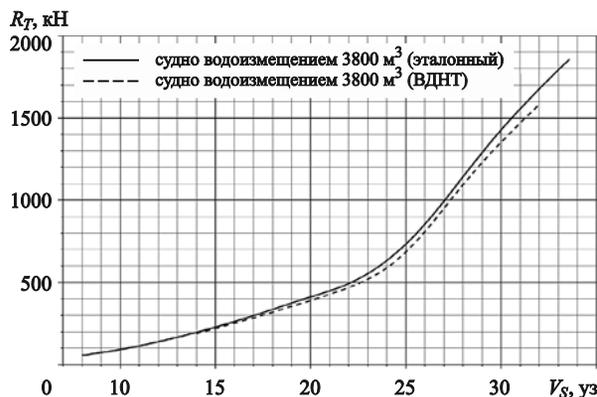


Рис. 9. Зависимость буксировочного сопротивления R_T от скорости V_S быстроходного судна водоизмещением 3800 м^3

Fig. 9. Speed V_S as function of towing resistance R_T for fast vessel with displacement of 3800 м^3



Рис. 10. Зависимость пропульсивного коэффициента η_D от скорости V_S быстроходного судна водоизмещением 3800 м^3

Fig. 10. Speed V_S as function of propulsive coefficient η_D for fast vessel with displacement of 3800 м^3

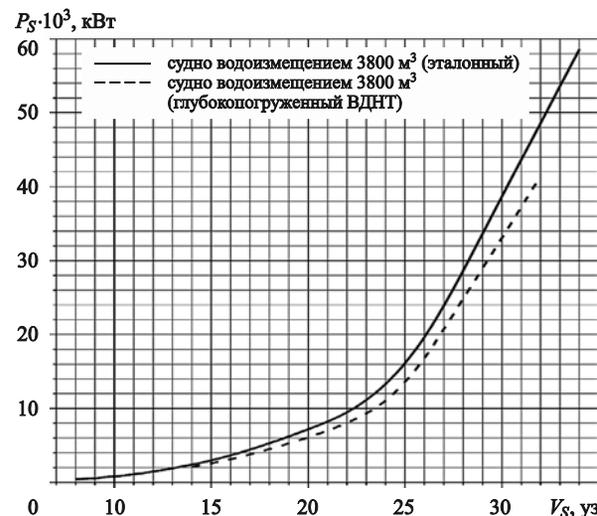


Рис. 11. Зависимость потребной мощности P_S от скорости V_S быстроходного судна водоизмещением 3800 м^3

Fig. 11. Speed V_S as function of required power P_S for fast vessel with displacement of 3800 м^3

Таблица 5. Сопоставление потребной мощности P_s быстроходного судна с водометными движителями насосного типа и эталонного быстроходного судна водоизмещением 3800 м³

Table 5. Power demand P_s of the fast vessel with pump-jet propulsion and reference fast vessel with displacement of 3800 m³

V_s , уз	P_s , кВт			Изменение %	
	эталонное быстроходное судно	судно с ВДНТ у свободной поверхности	судно с погруженными ВДНТ	судно с ВДНТ у свободной поверхности	судно с погруженными ВДНТ
14	2401,6	2013,9	2058,5	-16,1	-14,3
20	7182,3	5938,2	6084,1	-17,3	-15,3
30	3865,7	30340,5	33030,8	-21,5	-14,6

ления связано с уменьшением надбавки на выступающие части.

Пропульсивный коэффициент η_D быстроходного судна при применении глубоко погруженных ВДНТ выше, чем у эталонного судна, на 11–12 %. Такой заметный рост пропульсивного коэффициента связан с высоким КПД ВДНТ, примерно равным 0,7, а также с величиной коэффициента влияния корпуса, примерно равной 0,92–0,95. Полученная величина коэффициента влияния корпуса несколько меньше для случая с глубоко погруженными ВДНТ по сравнению с расположением ВДНТ около свободной поверхности.

Заключение

Conclusion

Выполнено исследование ходовых качеств быстроходного судна с глубоко погруженными под свободную поверхность водометными движителями насосного типа.

В результате модельных испытаний быстроходного судна с глубоко погруженными под свободную поверхность ВДНТ подтверждено движение задним ходом и возможность самостоятельного начала движения задним ходом быстроходного судна.

Расчет ходовых качеств быстроходного судна с глубоко погруженными ВДНТ в сравнении с вариантом частично погруженного ВДНТ показал приемлемые потери эффективности при движении судна. Рост потребной мощности P_s составил от 1,85 % при скорости 14 уз до 6,9 % при скорости 30 уз.

Снижение величины буксировочного сопротивления и заметный рост пропульсивного коэффициента приводят к тому, что потребная мощность P_s быстроходного судна с глубоко погруженными

ВДНТ оказывается на 14–15 % ниже, чем у эталонного судна, тем самым подтверждая целесообразность применения глубоко погруженного под свободную поверхность ВДНТ.

Список использованной литературы

1. Куликов С.В. Проектирование водометных движителей // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 1962. Вып. 185. С. 92–113.
2. Куликов С.В. Гидродинамика водометных движителей: дис. : дис. ... д-ра техн. наук. Ленинград, 1973.
3. Куликов С.В., Храмкин М.Ф. Водометные движители: (Теория и расчет). Ленинград: Судостроение, 1965. 272 с.
4. Лобачев М.П., Русецкий А.А., Яковлев А.Ю. Проектирование и гидродинамический расчет водометных движителей. Санкт-Петербург: Крыловский государственный научный центр, 2014. 144 с.
5. Сопоставление результатов ходовых испытаний судна с малогабаритным водометным движителем с данными модельных испытаний и расчетов / М.А. Мавлюдов, А.В. Пустошный, А.А. Русецкий, О.В. Яковлева // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2007. Вып. 31(315). С. 82–92.
6. Мавлюдов М.А., Русецкий А.А. Основы теории и проектирования водометных движителей. Санкт-Петербург: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2009. 94 с.
7. Папир А.Н. Водометные движители малых судов. Ленинград: Судостроение, 1970. 254 с.
8. Русецкий А.А., Жученко М.М., Дубровин О.В. Судовые движители. Ленинград: Судостроение, 1971. 286 с.
9. Яковлев А.Ю., Лобова А.Г. Профилирование поворотного колена водометного движителя в «плоской» постановке // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2010. Вып. 56(340). С. 195–210.
10. Яковлев А.Ю. Оптимизация формы «плоского» водозаборника // Наука и технологии: краткие сообщения

- XXX Российской школы, посвященной 65-летию Победы. Екатеринбург : УрО РАН, 2010. Т. 1. С. 65–73.
11. *Каневский Г.И., Клубничкин А.М., Александров С.А.* Коэффициенты взаимодействия водометного движителя насосного типа с корпусом // Проблемы мореходных качеств судов, корабельной гидромеханики и освоения шельфа (XLV Крыловские чтения) : доклады науч.-техн. конференции. Санкт-Петербург, 2013. С. 19–21.
 12. Исследование перспективности применения водометных движителей на фрегате проекта Б / *Каневский Г.И., Капранцев С.В., Соколов А.Л.* [и др.] // Труды Крыловского государственного научного центра. 2014. Вып. 85(369). С. 91–102.
 13. *Александров С.А., Каневский Г.И.* Оптимизация элементов водометного движителя насосного типа с коротким водоводом // Труды ЦНИИ им акад. А.Н. Крылова. 2015. Вып. 90(374). С. 11–19.
 14. *Соколов А.Л., Александров С.А., Каневский Г.И.* Совершенствование геометрических характеристик водометного движителя насосного типа для судов и кораблей // Труды Крыловского государственного научного центра. 2023. Вып. 1(403). С. 15–30. DOI: 10.24937/2542-2324-2023-1-403-15-30.
 15. *Каневский Г.И., Капранцев С.В., Соколов А.Л.* Быстроходные суда с водометными движителями насосного типа // Труды ЦНИИ им акад. А.Н. Крылова. 2015. Вып. 90(374). С. 5–10.
 16. *Alexander K.* Waterjet versus Propeller Engine Matching Characteristics // *Naval engineering journal*. 1995. Vol. 107, № 3. P. 129–139. DOI: 10.1111/j.1559-3584.1995.tb03041.x.
 17. Integral force/momentum water-jet model for CFD simulation / *Kandasamy M., Ooi S.K., Carrica P., Stern F.* // *Journal of fluids engineering*. 2010. Vol. 132, № 10. P. 101103 (9 p.). DOI: 10.1115/1.4002573.
 18. Prediction of caviting waterjet propulsor performance using boundary element method / *Kinnas S.A., Lee H.S., Michael T.J., Sun H.* // *Proceedings of 9th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics (NSH 2007)*. Ann Arbor, 2007. P. 1–14.
 19. *Terwisga T.J.C.* The Specialist Committee on Validation of Waterjet Test Procedures : Final Report and Recommendations to the 23rd ITTC // *Proceedings of the 23rd International Towing Tank Conference (ITTC 2002)*. Venice, 2002. Vol. 2. P. 379–407.
 2. *Kulikov S.V.* Hydrodynamics of water jets: Dr. Sci. theses. Leningrad, 1973 (*in Russian*).
 3. *Kulikov S.V., Khramkin M.F.* Water-jet propulsors: (Theory and calculation). Leningrad : Sudostroeniye, 1965. 272 p. (*in Russian*).
 4. *Lobachev M.P., Rusetsky A.A., Yakovlev A.Yu.* Design and hydrodynamic calculation of water jets. St. Petersburg : Krylov State Research Centre, 2014. 144 p. (*in Russian*).
 5. Comparing sea trials results of small-size water jet vessel against data of model tests and calculations / *M.A. Mavlyudov, A.V. Pustoshny, A.A. Rusetsky, O.V. Yakovleva* // *Transactions of Krylov Central Research Institute*. 2007. Vol. 31(315). P. 82–92 (*in Russian*).
 6. *Mavlyudov M.A., Rusetsky A.A.* // *Fundamentals of the theory and design of water jets*. St. Petersburg : Krylov Central Research Institute, 2009. 94 p. (*in Russian*).
 7. *Papir A.N.* Water jet propulsion of small craft. Leningrad : Sudostroeniye, 1970. 254 p. (*in Russian*).
 8. *Rusetsky A.A., Zhuchenko M.M., Dubrovin O.V.* Ship propulsion. Leningrad : Sudostroeniye, 1971. 286 p. (*in Russian*).
 9. *Yakovlev A.Yu., Lobova A.G.* Turning elbow profiling for water jet: “plane” formulation // *Transactions of Krylov Central Research Institute*. 2010. Vol. 56 (340). P. 195–210 (*in Russian*).
 10. *Yakovlev A.Yu.* Shape optimization for “flat” water scoop // *Science and Technologies: Transactions of the 30th Russian School dedicated to the 65th anniversary of Victory in 2nd World War*. Yekaterinburg : Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2010. Vol. 1. P. 65–73 (*in Russian*).
 11. *Kanevsky G.I., Klubnichkin A.M., Alexandrov S.A.* Coefficients of pumpjet-hull interaction // *Issues of ship sea-keeping performance, ship hydromechanics and offshore development (XLV Krylov readings): Transactions of science and technology conference*. St. Petersburg, 2013. P. 19–21 (*in Russian*).
 12. Study on water jets project B frigate application // *G.I. Kanevsky, S.V. Kaprantsev, A.L. Sokolov* [et al.] // *Transactions of Krylov State Research Centre*. 2014. Vol. 85(369). P. 91–102 (*in Russian*).
 13. *Alexandrov S.A., Kanevsky G.I.* Optimization of components for a pumpjet with short water duct // *Transactions of Krylov Central Research Institute*. 2015. Vol. 90(374). P. 11–19 (*in Russian*).
 14. *Sokolov A.L., Alexandrov S.A., Kanevsky G.I.* // Improving geometry of marine pumpjet // *Transactions of Krylov State Research Centre*. 2023. Vol. 1(403). P. 15–30. DOI: 10.24937/2542-2324-2023-1-403-15-30 (*in Russian*).
 15. *Kanevsky G.I., Kaprantsev S.V., Sokolov A.L.* Fast vessels with pump-jet propulsion // *Transactions of Krylov*

References

1. *Kulikov S.V.* Design of pump jets // *Transactions of Krylov Central Research Institute*. 1962. Vol. 185. P. 92–113 (*in Russian*).

- Central Research Institute. 2015. Vol. 90(374). P. 5–10 (in Russian).
16. Alexander K. Water-jet versus Propeller Engine Matching Characteristics // Naval engineering journal. 1995. Vol. 107, № 3. P. 129–139. DOI: 10.1111/j.1559-3584.1995.tb03041.x.
 17. Integral force/momentum water-jet model for CFD simulation / Kandasamy M., Ooi S.K., Carrica P., Stern F. // Journal of fluids engineering. 2010. Vol. 132, № 10. P. 101103 (9 p.). DOI: 10.1115/1.4002573.
 18. Prediction of cavitating water-jet propulsor performance using boundary element method / Kinnas S.A., Lee H.S., Michael T.J., Sun H. // Proceedings of 9th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics (NSH 2007). Ann Arbor, 2007. P. 1–14.
 19. Terwisga T.J.C. The Specialist Committee on Validation of Waterjet Test Procedures : Final Report and Recommendations to the 23rd ITTC // Proceedings of the 23rd International Towing Tank Conference (ITTC 2002). Venice, 2002. Vol. 2. P. 379–407.

Сведения об авторах

Соколов Александр Леонидович, к.т.н., главный конструктор АО «Северное проектно-конструкторское бюро». Адрес: 198096, Россия, Санкт-Петербург, Корабель-

ная ул., д. 6, корп. 2, лит. А. Тел.: +7 (812) 702-30-05. E-mail: spkb@mail.seanet.ru.

Александров Станислав Анатольевич, к.т.н., научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-47-91. E-mail: 2_otd@ksrc.ru. <https://orcid.org/0000-0003-2528-3070>.

Каневский Григорий Ильич, д.т.н., руководитель проектов ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-47-91. E-mail: gikanev@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-3445-4575>.

About the authors

Alexander L. Sokolov, Cand. Sci. (Eng.), Chief Designer, JSC Severnoe Design Bureau. Address: 6, building 2, lit. A., Korabelnaya st., St. Petersburg, Russia, post code 198096. Tel.: +7 (812) 702-30-05. E-mail: spkb@mail.seanet.ru.

Stanislav A. Aleksandrov, Cand. Sci. (Eng.), Researcher, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-47-91. E-mail: 2_otd@ksrc.ru. <https://orcid.org/0000-0003-2528-3070>.

Grigory I. Kanevsky, Dr. Sci. (Eng.), Project Manager, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. E-mail: gikanev@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-3445-4575>.

Поступила / Received: 27.03.24

Принята в печать / Accepted: 22.08.24

© Соколов А.Л., Александров С.А., Каневский Г.И., 2024