

УДК 629.5.036

DOI:10.37890/jwt.vi82.571

Результаты испытаний модели водометного движителя грузового катера

Е.С. Шишов

С.Н. Зеленов

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия

Аннотация. В статье рассматриваются результаты испытаний самоходной масштабной модели водометного грузового катера КС-110.2-34. Цель: измерение и расчет основных характеристик элементов пропульсивного комплекса катера и, в частности, установленного водометного движителя, для их последующего сравнения с характеристиками других, вновь разрабатываемых водометных движителей. Результаты: спроектирована и изготовлена масштабная модель пропульсивного комплекса, состоящая из моделей корпуса и водометного движителя исходной конструкции, с установленным измерительным оборудованием и блоком записи показаний.

Предложены программа испытаний, методика обработки результатов измерений и выполнена проверка их достоверности.

Было установлено, что результаты испытаний, полученные на открытой воде, имеют малую повторяемость в силу их высокой зависимости от гидро- и метеорологических условий, а неправильное размещение датчиков давлений в проточной части водомета снижает точность выполненных измерений.

Для получения более достоверных и стабильных результатов сделан вывод о необходимости увеличения масштаба модели и скорости ее хода. Определено дальнейшее направления работ по совершенствованию приборно-измерительного комплекса.

Ключевые слова: водометные движители, пропульсивный комплекс, модельные испытания, параметры работы.

Test results of a model of a water-jet propulsion of a cargo boat

Egor S. Shishov

Sergey N. Zelenov

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article discusses the test results of a self-propelled scale model of the KC-110.2-34 water-jet cargo boat. Purpose: to measure and calculate the main characteristics of the model of a water-jet propulsion system installed on a ship for their subsequent comparison with the characteristics of other newly developed water-jet propulsion systems. Results: a large-scale model of the propulsion system was designed and manufactured, consisting of models of a boat hull and a water-jet propulsion system of the original design, installed measuring equipment and a reading recording unit.

A test program and a methodology for processing measurement results are proposed and their reliability is verified. It was found that the test results obtained in open water have low repeatability due to their high dependence on hydro and meteorological conditions, and incorrect placement of pressure sensors in the flowing part of the water cannon reduces the accuracy of the measurements performed.

In order to obtain more reliable and stable results, it is concluded that it is necessary to increase the scale of the model and its speed. Further directions of work on improving the instrument and measuring complex have been determined.

Keywords: water-jet propellers, propulsive complex, model tests, operation parameters.

Введение

В работе [1] отмечается, что водометный движитель не сильно уступает по пропульсивным качествам гребным винтам, а в некоторых случаях превосходит их. Существует два основных фактора – кавитация и аэрация водометного движителя, которые отрицательно влияют на работу движителя. Для решения этих проблем принимают различные конструктивные изменения в устройстве водометного движителя.

Моделирование работы движителя с учетом возникновения кавитации и аэрации не представляется возможным аналитическим путем. Эмпирические модели, численное 3D-моделирование, решение сложных математических систем уравнений дают лишь приближенные результаты. Поэтому, обязательным этапом разработки водометных движителей являются испытания, проводящиеся в специальных опытовых бассейнах и кавитационных трубах и которые позволяют сравнить расчетные параметры с результатами физического эксперимента.

Однако испытания, проводимые в опытовых бассейнах и кавитационных трубах, являются достаточно технически сложными и финансово затратными. Потому, для упрощения проведения экспериментов с разрабатываемыми движителями была создана масштабная модель корпуса катера, изготовленная путем послойного наплавления пластика на FFF (Fused Filament Fabrication) 3D-принтере. Такая модель позволяет устанавливать конструктивно различные водометные движители в размерах одного корпуса и сравнивать основные параметры их работы. Очевидным недостатком этого решения является зависимость от погодных условий, так как испытания проводятся на открытых естественных акваториях, а также малый размер стенда, что приводит к необходимости учитывать масштабный фактор.

Методы

В качестве объекта исследования был выбран грузовой катер проекта КС-110.2-34 (рис. 1) производства АО «Костромской судомеханический завод». Главные размерения и основные характеристика катера приведены в табл. 1. Катер предназначен для перевозки грузов, обладает малой осадкой, оснащен водометным движителем, обладает хорошей маневренностью и не требует создания причальной инфраструктуры [2].



Рис. 1. Грузовой катер КС-110.2-34 [2]

Таблица 1

Главные размерения и основные характеристики катера [2]

$L_{гб}$, м	17	Длина габаритная
$B_{гб}$, м	3,12	Ширина габаритная
$T_{ср}$, м	0,5	Средняя осадка
$D_{гр}$, т	17	Водоизмещение в грузу
N_e , кВт	307	Эффективная мощность
v_x , км/ч	40	Скорость хода

На рис. 2 представлены трехмерные модели корпуса катера и нового, спроектированного по методике [3], водометного движителя выполненные в масштабе 1:15; на рис. 3 – внешний вид модели пропульсивного комплекса катера. На этом же рисунке также видно размещение датчиков давления измерительного комплекса.

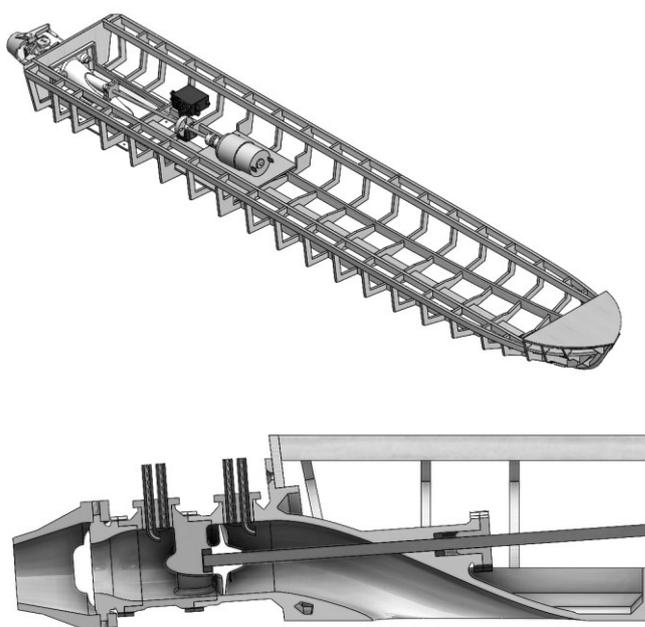


Рис. 2. Трехмерная модель корпуса и водометного движителя

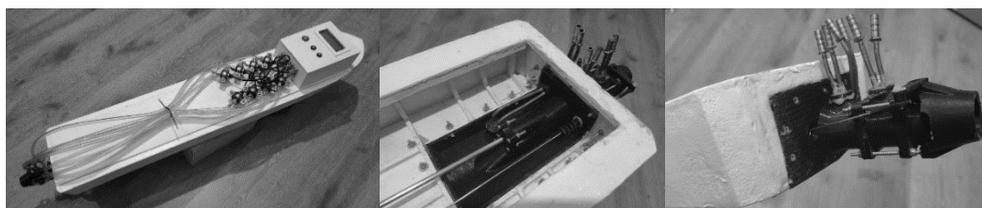


Рис. 3. Внешний вид модели изготовленного пропульсивного комплекса с датчиками давления

В табл. 2, приведены основные геометрические характеристики отдельных частей испытываемой модели водометного движителя.

Испытательный комплекс представляет собой радиоуправляемый самоходный корпус катера с установленным блоком записи показаний и измерительным оборудованием и модель испытываемого водометного движителя с установленными измерительными трубками для измерения статического и динамического давления в характерных сечениях.

Таблица 2

Геометрические характеристики модели и натуре водометного движителя

Элемент водометного движителя	Размер модели	Размер натуре
Водозаборник		
Длина, мм	92,4	1386
Ширина, мм	23,1	346,5
Угол входа, °	20,0	20,0
Водовод		
Диаметр трубы, мм	30,8	462
Высота подъема, мм	28,0	420
Длина проточной части, мм	171,6	2574
Импеллер		
Профиль лопастей	параболический	параболический
Число лопастей, шт.	4	4
Диаметр импеллера, мм	30,6	460
Диаметр ступицы, мм	12,3	184
Шаговое отношение	0,987	0,987
Дисковое отношение	0,7	0,7
Относительная поступь	0,52	0,52
Пропульсивный КПД	0,51	0,51
Спрямяющий аппарат		
Число лопастей, шт.	5	5
Сопло		
Диаметр выходного сечения, мм	21,4	321,0
Длина, мм	20,48	307,2

В основе блока записи показаний используется микроконтроллер ATmega 328P, который по шине I²C принимает показания с пары 16-битных аналого-цифровых преобразователей ADS1115 и микросхемы измерения, потребляемой электродвигателем мощности INA226. Напрямую обрабатываются сигналы с датчика частоты вращения, на основе фотопрерывателя ИТР9608, при помощи аппаратных

прерываний микроконтроллера вычисляется частота вращения вала. По шине SPI производится запись данных с датчиков на microSD карту, которая после проведения замеров считывается при помощи персонального компьютера.

Основная задача разрабатываемого стенда заключается в определении зависимостей скорости хода модели V_x , создаваемой двигателем тяги P , потребляемой мощности N , расхода Q , напора (давления) H и КПД рабочего колеса $\eta_{рк}$ от частоты вращения вала электродвигателя. Скорость хода модели во время испытаний определяется при помощи замедленной съемки: подсчета количества кадров и за время прохождения контрольного участка, равного 1 м. Потребляемая мощность измеряется при помощи токоизмерительного шунта и вольтметра. Частота вращения – при помощи оптического датчика частоты вращения. Тяга, расход, напор и КПД определяются расчетом, на основе показаний датчиков давления.

Измерительный комплекс (рис. 4) позволяет измерить значения полного и статического давлений в трех характерных сечениях (перед рабочим колесом, после рабочего колеса, на срезе сопла). Используя измеренные значения давлений, рассчитываются указанные характеристики двигателя при различной частоте вращения рабочего колеса. Далее, используя найденные значения характеристик, производится сравнение эффективности работы различных моделей водометных двигателей.

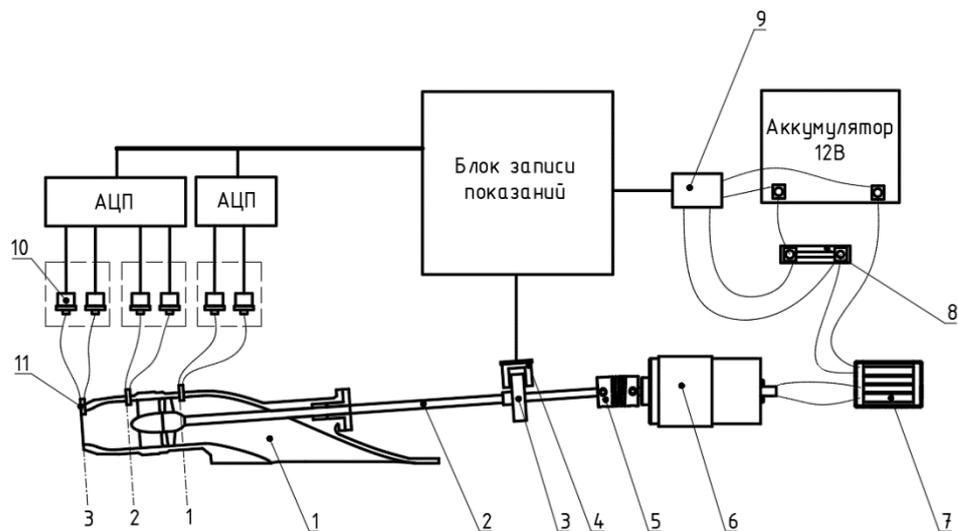


Рис. 4. Схема измерительного комплекса: 1 – водометный движитель; 2 – валопровод; 3 – шелевой диск; 4 – оптический датчик частоты вращения; 5 – соединительная муфта; 6 – электродвигатель; 7 – регулятор мощности двигателя; 8 – токоизмерительный шунт; 9 – вольтамперметр; 10 – датчики давления; 11 – измерительные трубки

Ходовые испытания модели проводились в соответствии с составленной программой, которая предполагала их исполнение на открытой акватории р. Волга.

Прогонка модели проходила на мерном участке с соблюдением следующих условий:

- испытания проводятся на прямолинейном отрезке длиной 5 м в двух направлениях: против и по течению реки;
- длина контрольного участка (рис. 5) для измерения скорости равна 1 м;
- выполняется не менее 5 замеров в обе стороны движения. Запись показаний производится с интервалом 0,5 с.

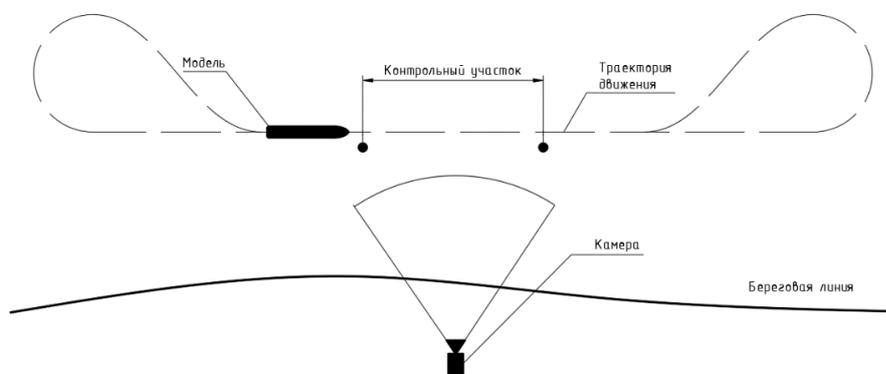


Рис. 5. Контрольный участок для измерения скорости хода модели

Скорость измерялась при помощи видеокамеры из расчета времени между началом и концом прохождения модели через мерный участок (рис. 6).

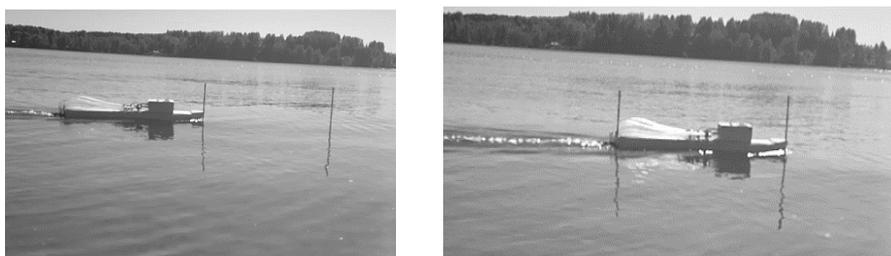


Рис. 6. Прохождение модели через мерный участок

Результаты и обсуждение

Результаты измерений сводятся в таблицы, а для исключения случайных погрешностей подвергаются статистической обработке. Для определения соответствия результатов выполненных экспериментов нормальному распределению был принят пакет программного обеспечения численного анализа Origin 2015, в частности, применен критерий Шапиро-Уилка, который равно эффективен как при малых, так и при больших объемах выборки. В нашем случае задавалось условие, что гипотеза о нормальности распределения справедлива при Р-значении большем 0,05. [4]

На рис. 7 представлены графики зависимости показаний измеряемых величин от номера измерения n для максимальной мощности электродвигателя 175 Вт при усредненной частоте вращения 10124 об/мин. Условия окружающей среды во время проведения измерений: атмосферное давление 100,6 кПа, температура воздуха +17 °С, средняя скорость ветра 3 м/с, температура воды +11 °С.

В табл. 3 приведены усредненные обработанные результаты измерений пяти режимов хода в зависимости от потребляемой мощности электродвигателя 100, 95, 70, 40, 30 % (округленно).

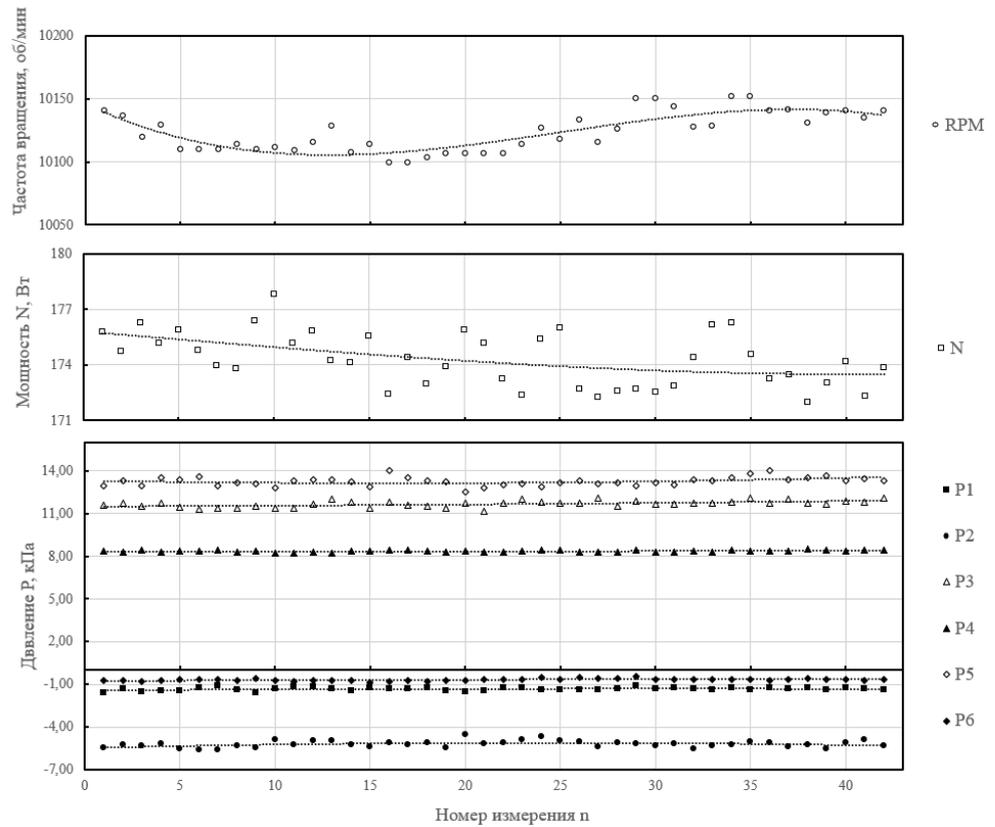


Рис. 7. Показания измерений при 10124 об/мин: P1 – полное давление перед рабочим колесом, P2 – статическое давление перед рабочим колесом, P3 – полное давление за рабочим колесом, P4 – статическое давление за рабочим колесом, P5 – полное давление на срезе сопла, P6 – статическое давление на срезе сопла, кПа, N – потребляемая электродвигателем мощность, Вт, RPM – частота вращения электродвигателя, об/мин.

Таблица 3

Усредненные результаты испытаний при различной потребляемой мощности

Мощность, %	Мощность, Вт	Частота вращения, об/мин	Показания датчиков давления, кПа					
			P1	P2	P3	P4	P5	P6
100	174,19	10124	-1,33	-5,20	11,67	8,36	13,25	-0,68
95	166,4	9715	-1,83	-8,19	10,56	8,44	13,63	-0,65
70	121,05	8006	-1,40	-4,39	8,03	5,81	9,90	-0,56
40	73,42	6198	-1,56	-5,39	3,54	2,98	5,47	-0,54
30	57,72	5674	-1,96	-5,25	1,49	1,73	3,58	-0,69

На основе полученных результатов производится расчет основных параметров работы водометного движителя для различных частот вращения (табл. 4) по формулам (1) – (6) из источников [5], [6] и [7].

$$H = \frac{P_1 - P_3}{g}, \tag{1}$$

где H – напор рабочего колеса, м; P_1 – полное давление перед рабочим колесом, кПа; P_3 – полное давление за рабочим колесом, кПа

$$v_4 = \sqrt{2(P_5 - P_6)}, \tag{2}$$

где v_4 – скорость на срезе сопла, м/с; P_5 – полное давление на срезе сопла, кПа; P_6 – статическое давление на срезе сопла, кПа.

$$Q = v_4 S_c, \tag{3}$$

где Q – расход через движитель, м³/с; $S_c = 0.000345$ м² площадь сечения срез сопла.

$$P = \rho Q(v_4 - v_x), \tag{4}$$

где v_x – скорость хода, м/с.

$$N_{\Pi} = \eta_{\text{э}} \eta_{\text{вп}} N, \tag{5}$$

где N_{Π} – потребляемая мощность движителем, Вт; $\eta_{\text{э}} = 0,7$ – КПД электродвигателя; $\eta_{\text{вп}} = 0,95$ – КПД валопровода, N – мощности электродвигателем.

$$\eta_{\text{рк}} = 100 \frac{\rho g H Q}{N_{\Pi}} \tag{6}$$

где $\eta_{\text{рк}}$ – КПД рабочего колеса, %.

Таблица 4

Основные параметры водометного движителя в зависимости от частоты вращения

Частота вращения, об/мин	Скорость хода v_x , м/с	Скорость на срезе сопла v_4 , м/с	Расход через движитель Q , м ³ /с	Напор рабочего колеса H , м	Тяга движителя P , Н	Потребляемая мощность движителя N_{Π} , Вт	КПД рабочего колеса $\eta_{\text{рк}}$, %
10124	1,29	5,28	0,00182	1,32	7,26	115,8	20,4
9715	1,34	5,34	0,00182	1,26	7,38	110,7	20,6
8006	1,15	4,57	0,00158	0,96	5,4	80,5	18,5
6198	1,09	3,47	0,00120	0,52	2,84	48,8	12,5
5674	0,88	2,93	0,00101	0,35	2,06	38,4	9,1

На основании данных табл. 4 построены зависимости (рис. 8.) тяги P , расхода Q , напора H , КПД $\eta_{\text{рк}}$ от частоты вращения вала электродвигателя. Полученные зависимости отражают параметры работы модели водометного движителя. Из графиков видно, что при работе движителя при частоте вращения около 10000 об/мин начинается

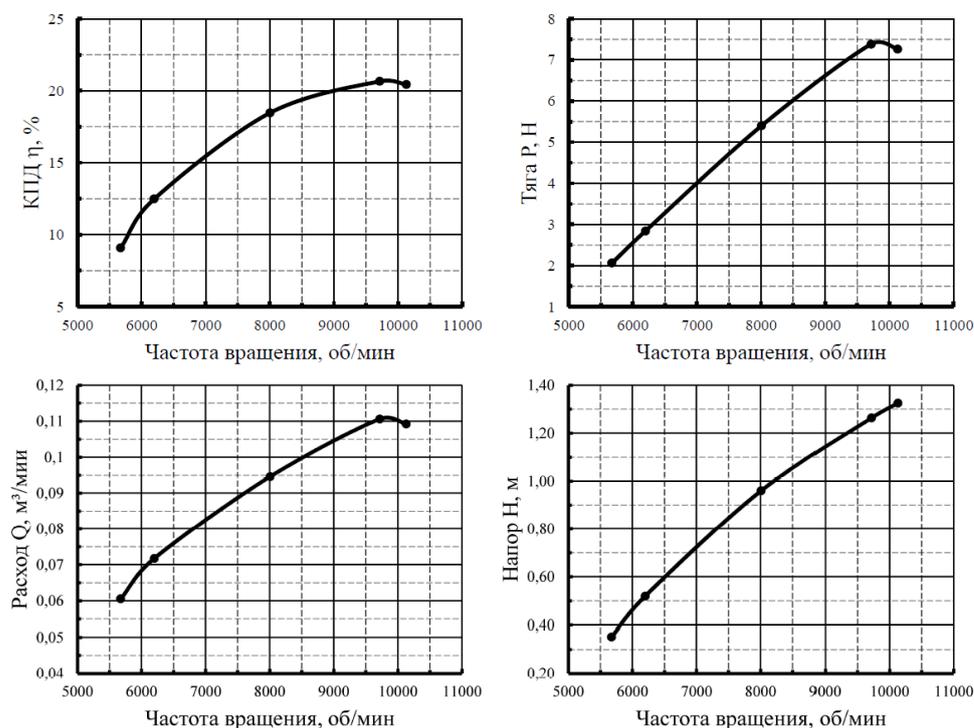


Рис. 8. Зависимости основных параметров работы водометного движителя от его частоты вращения

снижение создаваемой тяги и расхода через движитель, а также его КПД, что говорит о не эффективной работе данного рабочего колеса при более высокой частоте вращения. Таким образом строя аналогичные графики для рабочих колес с иным шагом, дисковым отношением, числом лопастей, для самих водометных движителей иной конструкции, можно в дальнейшем сравнивать между собой на основе полученных зависимостей и оптимального диапазона работы.

Выводы

Выполненные на специально созданном пропульсивном комплексе грузового катера КС-110.02-34 исследования, позволяют сделать следующие выводы.

1. В работе были определены только основные «внешние» характеристики проектируемого водометного движителя, что является лишь частью представления об эффективности его использования на катере. Для более полной оценки характеристик проектируемого водомета и путей их улучшения необходимы дополнительные исследования характера течения жидкости в насосной части водомета, момента возникновения кавитации, сопротивления в его характерных проточных частях, взаимодействия с корпусом и т.д., что определяет дальнейшее направление работ по совершенствованию измерительного комплекса. Например, выявленная некорректность показаний пары датчиков P1 и P2, была вызвана близким расположением измерительных трубок к всасывающей области рабочего колеса. Для уточнения показаний необходимо расположить измерительные трубки ближе к водозаборной части водомета.

2. Представленные графические зависимости параметров работы спроектированного водометного движителя, полученные на созданной экспериментальной модели катера, не противоречат уже известным практическим данным. В результате можно полагать, что разработанные пропульсивный и измерительный комплексы модели катера, позволяют достаточно достоверно определять основные параметры водометов на начальном этапе их проектирования. Как показывает практика, этих параметров достаточно для последующего предварительного сравнения моделей различных конструкций водометов, отличающихся геометрическими размерами, типом рабочего колеса, спрямляющими, сопловыми аппаратами, разными водозаборниками и т.д.

Список литературы

1. Зеленев С.Н., Шишов Е.С. Особенности выбора двигательного комплекса речных судов // Сетевой научный журнал «Транспортные системы». Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2023. № 2(28). С. 40-49. URL: <https://transport-systems.ru/index.php/arkhiv/44-2023/46-2-2023-g/150-2023-02-4>
2. Катер КС-110.2-34 [Электронный ресурс] - <https://boat-ksmz.ru/katera/ks-110-2/ks-110-2-gruzovoy/> (дата обращения – 28.01.2024).
3. Хорхорин Е.Г. Стационарные водометы. Справочник. М.: «Издательский Дом Рученькиных», 2004. 160 с.
4. Никитин О.Р. Статистические методы обработки параметров радиосигналов. Учебное пособие. Владимир: ВлГУ, 2012. 143 с.
5. Папир А.Н. Водометные движители малых судов. Л.: Судостроение, 1970. 256 с.
6. Васильев В.Ф. Водометные движители: Учебное пособие. М.: МАДИ, 2006. 45 с.
7. Куликов С.В., Храшкин М.Ф. Водометные движители (теория и расчет) – 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Судостроение, 1980. 312 с.

References

1. Zelenov S.N., Shishov E.S. Osobennosti vybora dvizhitel'nogo kompleksa rechnyh sudov [Features of choosing a propulsion system for river vessels]// Setevoy nauchnyj zhurnal «Transportnye sistemy». Nizhny Novgorod: NSTU n.a. R.E. Alekseev, 2023, no. 2(28). P. 40-49. URL: <https://transport-systems.ru/index.php/arkhiv/44-2023/46-2-2023-g/150-2023-02-4>
2. Kater KS-110.2-34 – Available online: <https://boat-ksmz.ru/katera/ks-110-2/ks-110-2-gruzovoy/> (date of access– 28.01.2024).
3. Horhorin E.G. Stacionarnye vodomety. Spravochnik. M.: «Izdatel'skij Dom Ruchen'kinyh», 2004. 160 s. (In Russ.).
4. Nikitin O.R. Statisticheskie metody obrabotki parametrov radiosignalov. Uchebnoe posobie. Vladimir: VIGU, 2012. 143 p. (In Russ.).
5. Papir A.N. Vodometnye dvizhiteli malyh sudov. L.: Sudostroenie, 1970. 256 p. (In Russ.).
6. Vasil'ev V.F. Vodometnye dvizhiteli: Uchebnoe posobie. M.: MADI, 2006. 45 p. (In Russ.).
7. Kulikov S.V., Hramkin M.F. Vodometnye dvizhiteli (teoriya i raschet) – 3-e izd., pererab. i dop. L.: Sudostroenie, 1980. 312 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ/ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Шишов Егор Сергеевич, аспирант,
Нижегородский государственный
технический университет им. Р.Е. Алексеева
(ФГБОУ ВО НГТУ им. Р.Е. Алексеева),
603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24,
email: egor370mv@gmail.com

Egor S. Shishov, postgraduate student, Nizhny
Novgorod State Technical University n.a. R.E.
Alekseev (NSTU n.a. R.E. Alekseev), Minina,
24, Nizhny Novgorod, 603155, Russian
Federation, e-mail: egor370mv@gmail.com

Зеленов Сергей Николаевич, к.т.н., доцент кафедры «Энергетические установки и тепловые двигатели», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева (ФГБОУ ВО «НГТУ им. Р.Е. Алексева»), 603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, email: zelenov.52@yandex.ru

Sergey N. Zelenov, Ph.D. (eng), Associate Professor of the Power Plants and Heat Engines, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev (NSTU n.a. R.E. Alekseev), Minina, 24, Nizhny Novgorod, 603155, Russian Federation, e-mail: zelenov.52@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 16.01.2025; опубликована онлайн 20.03.2025.
Received 16.01.2025; published online 20.03.2025.