На правах рукописи

# АЛЕКСАНДРОВ СТАНИСЛАВ АНАТОЛЬЕВИЧ

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ И КАВИТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДОМЕТНОГО ДВИЖИТЕЛЯ НАСОСНОГО ТИПА, НАПРАВЛЕННОЕ НА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЕГО ЭЛЕМЕНТОВ

Специальность 05.08.01 - «Теория корабля и строительная механика»

АВТОРЕФЕРАТ Диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2018

Работа выполнена в ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

Научный руководитель: Каневский Григорий Ильич, доктор технических наук, руководитель проектов, ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

Официальные оппоненты: Никущенко Дмитрий Владимирович, доктор технических наук, проректор по научной работе ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет»; Мостовский Николай Петрович, кандидат технических наук, конструктор 2 категории высшей квалификации АО «ЦКБ МТ «Рубин»;

Ведущая организация:	Акционерное общество «Северное проектно-конструкторское
	бюро», г. Санкт-Петербург

Защита состоится «\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 года в \_\_\_\_\_часов \_\_\_\_ минут на заседании диссертационного совета Д 411.004.01 при ФГУП «Крыловский государственный научный центр» по адресу: г. Санкт-Петербург, Московское ш., д. 44.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГУП «Крыловский государственный научный центр» и на сайте <u>http://www.krylov-centre.ru</u> в разделе «Ученый и диссертационные советы»

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_ 2018 г.

Отзывы просим направлять в 2-х экземплярах по адресу: По почте – 196158, г. Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44, ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

Ученый секретарь диссертационного совета д.т.н. **Актуальность темы.** В соответствии с рядом государственных программ Российской Федерации одной из наиболее важных задач отечественного кораблестроения является проектирование и строительство эффективных судов и кораблей военно-морского флота (ВМФ).

В России накоплен многолетний опыт создания судов и кораблей ВМФ с гребными винтами в качестве движителей, однако дальнейшее повышение их эффективности за счет совершенствования элементов гребных винтов является затруднительным.

Вплоть до последнего времени применение водометных движителей на кораблях ВМФ сдерживалось низкой эффективностью водометов при движении на экономическом или эскадренном ходах.

Одним из направлений повышения эффективности кораблей ВМФ является применение таких водометных движителей, которые обеспечивают заметное снижение расхода топлива по сравнению с гребными винтами на всех режимах движения корабля.

Теории и расчету параметров водометных движителей посвящено значительное число публикаций в Российской Федерации и за рубежом. Среди них можно отметить работы А. Н. Папира, С. В. Куликова, А. А. Русецкого, Г. И. Каневского М. А. Мавлюдова. В этих работах подробно рассмотрена струйная теория водометных движителей и предложены методы определения оптимальных элементов для заданных условий проектирования. В современной литературе в работах М. П. Лобачева и А. Ю. Яковлева представлены результаты расчетов локальных характеристик водометных движителей с помощью численного моделирования. Указанные подходы дополняют друг друга и позволяют проанализировать процессы, происходящие при работе водометного движителя.

В зарубежной литературе используются два термина:

- «water jet» (водометный движитель струйного типа (ВДСТ));

- «pump jet» (водометный движитель насосного типа (ВДНТ)).

Водометные движители струйного типа характеризуются наличием длинного водовода, расположенного внутри корпуса корабля. Эти движители невозможно отделить от корпуса без его разрушения. Для этого типа движителей понятие испытаний в «свободной воде» некорректно; можно провести испытания ВДСТ на специальном стенде. Областью применения этого типа водометных движителей являются быстроходные катера и корабли. Типичным представителем этого типа водометных движителей являются изделия компании «Rolls-Royce». Совершенствованию конструкции и теоретическим аспектам работы ВДСТ посвящено значительное число публикаций в современной литературе.

ВДНТ имеют короткий водовод, расположенный вне корпуса корабля или изделия. Эти движители могут быть естественным образом отделены от корпуса и для них определено понятие испытаний в «свободной воде». Типичными представителями этого типа являются водометные движители морского оружия.

Рассматривая примеры практического применения водометных движителей на кораблях и судах, следует упомянуть достижения фирмы «Rolls-Royce», разработавшей типоряд водометов различной мощности, максимальная из которых составляет 25 МВт. Четыре движителя компании «Rolls-Royce», установленные на корабле прибрежной зоны (Lateral Combat Ship) «Freedom», суммарной мощностью 100 МВт позволяют кораблю водоизмещением около 3000 м<sup>3</sup> развивать скорость хода 50 уз.

Компанией «Rolls-Royce» разработан типоряд погруженных водометных движителей, среди которых движители для эсминца водоизмещением 6000 м<sup>3</sup> со скоростью полного хода 30 уз. Полунатурные испытания, проведенные на демонстраторе на Великих озерах США, показали отличные акустические качества. Тем не менее, есть информация, что реальный корабль строится с гребными винтами на валах с кронштейнами. Принятое решение связано с недопустимо низкой эффективностью разработанных водометных движителей на экономическом и эскадренном ходах корабля.

По-видимому, первым кораблем с ВДНТ является ракетный катер типа «Буян», построенный в Российской Федерации, оснащенный малогабаритными водометными движителями (МГВД), разработанными М. А. Мавлюдовым. МГВД обладают достаточной эффективностью при всех скоростях хода.

В диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук в 1973 г. С. В. Куликов разработал две конструкции водометных движителей насосного типа. Первая конструкция широко применялась при изготовлении морского оружия. Вторая конструкция, предназначенная для надводных водоизмещающих кораблей, до настоящего времени не нашла своего применения. Коэффициент полезного действия указанной конструкции в «свободной воде» равен 0.68. Такая высокая эффективность обеспечивается конструкцией ВДНТ, имеющей короткий водовод, длина которого составляет 65 % от диаметра рабочего колеса. Данная эффективность соизмерима с эффективностью гребных винтов, однако попытки установки ВДНТ на реальные корабли не привели к положительным результатам ни в Российской Федерации, ни за рубежом.

Ситуация изменилась после анализа материалов исследований, выполненных М. А. Мавлюдовым. Для получения приемлемых ходовых качеств предложенный М. А. Мавлюдовым МГВД располагался на корабле таким образом, что часть рабочего колеса «на стопе» оказалась над водой.

При выполнении работ по ОКР «Контур» модель высокоэффективной конструкции, предложенной С. В. Куликовым, располагалась на схематизированной модели корабля по схеме, предложенной М. А. Мавлюдовым. В проведенных экспериментах, выполненных на схематизированной одновальной модели с применением ВДНТ с коротким водоводом, впервые показана принципиальная возможность получения высокой эффективности водометов на полном, среднем и малом ходах. В дальнейших исследованиях выяснено, что предельное возвышение рабочего колеса над водой составляет 25 % от диаметра. При большем возвышении отсутствует тяга вперед на швартовах. При меньшем возвышении падает эффективность движителя.

С этого времени актуальным становится совершенствование конструкции ВДНТ для применения на кораблях ВМФ. Данная диссертационная работа посвящена решению актуальной задачи совершенствования элементов водометного движителя насосного типа путем исследования его гидродинамических и кавитационных характеристик.

**Целью работы** является совершенствование элементов водометного движителя насосного типа путем экспериментального и теоретического исследования его гидродинамических и кавитационных характеристик.

Для достижения поставленной цели должны быть решены следующие основные задачи:

- 1. Экспериментальное и теоретическое исследование гидродинамических и кавитационных характеристик базовой версии водометного движителя насосного типа.
- 2. Совершенствование геометрических характеристик водометного движителя насосного типа, направленное на устранение дефектов гидродинамических и кавитационных характеристик его базовой версии.
- 3. Экспериментальное и теоретическое исследование гидродинамических и кавитационных характеристик водометного движителя насосного типа с усовершенствованными геометрическими характеристиками.
- 4. Экспериментальное исследование гидродинамических и кавитационных характеристик серии водометных движителей насосного типа с усовершенствованными геометрическими элементами.

Объектом исследования настоящей диссертационной работы является водометный движитель насосного типа и элементы его конструкции.

**Предметом исследований** являются гидродинамические и кавитационные характеристики водометного движителя насосного типа, а также способы улучшения этих характеристик при работе водометного движителя.

Методы исследования. Для решения поставленных задач в работе используются методы теоретических и экспериментальных исследований, принятые в теории корабля. Для численного моделирования работы водометного движителя использовался коммерческий пакет StarCCM+ фирмы Siemens, а также методы расчета обтекания профилей в идеальной и вязкой жидкости, разработанные в Крыловском государственном научном центре.

### Основные научные результаты и их новизна:

- 1. Определены направления совершенствования в геометрии элементов базовой версии водометного движителя насосного типа путем проведения экспериментального и теоретического исследования гидродинамических и кавитационных характеристик.
- 2. Предложена профилировка лопастей рабочего колеса и спрямляющего аппарата, направленная на улучшение гидродинамических и кавитационных характеристик базовой версии водометных движителей насосного типа.
- 3. Предложены откорректированные формы направляющей насадки и кормового обтекателя ВДНТ. Выполнено экспериментальное и теоретическое исследование гидродинамических и кавитационных характеристик водометного движителя насосного типа с усовершенствованными геометрическими элементами. Полученные результаты показали рост КПД на 3–5 % по сравнению с базовой версией, а также исчезновение нескольких видов кавитации.
- 4. Разработана серия водометных движителей насосного типа, для которой выполнено экспериментальное исследование гидродинамических и кавитационных характеристик. Наличие серии ВДНТ позволяет проектировать водометный движитель с учетом реальных условий работы.

**Практическая ценность** работы связана с решением важной задачи повышения эффективности судов и кораблей путем применения водометных движителей насосного типа, обеспечивающих заметное снижение расхода топлива по сравнению с гребными винтами. Показано, что применение водометных движителей насосного типа с усовершенствованными геометрическими элементами приводит к дополнительной экономии расхода топлива на 3–5 % по сравнению с применением водометного движителя базовой версии.

На защиту выносятся следующие положения:

- 1. Направления совершенствования геометрии элементов базовой версии водометного движителя насосного типа, определенные путем проведения экспериментального и теоретического исследования гидродинамических и кавитационных характеристик.
- 2. Усовершенствованная профилировка лопастей рабочего колеса и спрямляющего аппарата, направленная на улучшение гидродинамических и кавитационных характеристик базовой версии водометных движителей насосного типа.
- 3. Откорректированные форма направляющей насадки и форма обтекателя спрямляющего аппарата, а также результаты экспериментального и теоретического исследования гидродинамических и кавитационных характеристик водометного движителя насосного типа с усовершенствованными геометрическими характеристиками, которые показали рост КПД на 3–5 % по сравнению с базовой версией, а также улучшение кавитационных характеристик.
- 4. Серия водометных движителей насосного типа, для которой выполнено экспериментальное исследование гидродинамических и кавитационных характеристик. Наличие серии ВДНТ позволяет проектировать водометный движитель с учетом реальных условий работы.

Внедрение результатов работы. Результаты работы использованы ОАО «ЦМКБ «Алмаз»» при строительстве полунатурной модели корабля с ВДНТ по ОКР «Стабилизация». Испытания на открытом водоеме полунатурной модели корабля с ВДНТ продемонстрировали

устойчивую работу водометов на переднем ходу, на прямом курсе и на циркуляции, на «тихой воде» и на волнении.

Достоверность полученных результатов подтверждена согласованием значений гидродинамических характеристик, полученных при расчетах, и модельных испытаниях, результатами испытаний полунатурной модели корабля по ОКР «Стабилизация», а также использованием штатных, аттестованных методик проведения испытаний в опытовом бассейне.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации обсуждались на конференции «Российское кораблестроение от академика А. Н. Крылова до наших дней» в 2014 г., а также на 15-й школе-семинаре «Модели и методы аэродинамики» в июне 2015 г. и конференции молодых ученых и специалистов в ФГУП «Крыловский государственный научный центр» в октябре 2015 г.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 7 научно-технических статей, из них в изданиях, рекомендуемых перечнем ВАК РФ, опубликовано 4 работы, в числе которых 2 работы имеют 100 %-ное участие автора. По теме диссертации получен патент Российской Федерации на изобретение.

**Личный вклад.** Все исследования и разработки, описанные в настоящей диссертационной работе, выполнены автором лично.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, 4-х глав и заключения, содержит 109 страниц основного текста, включая 19 таблиц, 92 рисунка, 2 страницы оглавления и список литературы из 93 наименований.

#### 1. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования, описана постановка задачи, сформулированы результаты, выносимые на защиту, а также научная новизна и практическая значимость работы. Приведено краткое содержание работы по главам.

**В первой главе** выполнено экспериментальное и теоретическое исследование гидродинамических и кавитационных характеристик базовой версии водометного движителя.

В качестве объекта исследований в данной работе выбран ВДНТ, который по современной классификации имеет тип «pump jet», разрабатываемый сотрудниками ФГУП «Крыловский государственный научный центр» на протяжении долгого времени и описанный в патенте на изобретение № 2537351 Российской Федерации.

На рисунке 1 приведена схема базовой версии водометного движителя. Движитель состоит из рабочего колеса правого вращения с диаметром ступицы d<sub>ст</sub> = 0.5D диаметра рабочего колеса. Соответственно длина лопастей составляет 0.5R радиуса рабочего колеса, число лопастей Z = 5. Рабочее колесо вращается в направляющей насадке сегментного сечения с внутренней цилиндрической поверхностью и диаметром D<sub>d</sub> = 1.01D. Длина направляющей насадки  $l_{\rm H} = 0.65 \text{D}$ . За рабочим колесом располагается неподвижный спрямляющий аппарат левого направления, имеющий 6 лопастей, соединенных с направляющей насадкой. Диаметр ступицы спрямляющего аппарата увеличивается от носовой плоскости, где составляет  $d_{cr} = 0.5D$ , к кормовой плоскости, где d<sub>ст</sub> = 0.7D. Тогда длина лопасти спрямляющего аппарата на кормовой части составляет 0.3R радиуса рабочего колеса. У данного движительного комплекса вода течет в кольцевом зазоре шириной 0.5R на входе в водомет и 0.3R на выходе. За спрямляющим аппаратом располагается кормовой обтекатель с плавно уменьшающимся диаметром, имеющий значительную протяженность. При движении от носа в корму диаметр ступицы спрямляющего аппарата постоянно растет от 0.5D до 0.7D на выходе из направляющей насадки. Отношение выходящей и входящей площадей β = 0.666. Наличие принятого в конструкции поджатия потока приводит к резкому росту давления в месте расположения рабочего колеса и улучшает кавитационные характеристики водометного движителя.



Рисунок 1. Схема водометного движителя типа насосного типа

Для проведения модельных испытаний водометного движителя в «свободной воде» была изготовлена модель базовой версии водометного движителя с диаметром рабочего колеса D = 200 мм. На рисунке 2 приведен общий вид модели ВДНТ на установке для испытаний в «свободной воде».



Рисунок 2. Общий вид модели ВДНТ на установке для испытаний в «свободной воде» в опытовом бассейне

Далее были проведены испытания в «свободной воде» в глубоководном бассейне Крыловского государственного научного центра. Результаты этих испытаний приведены на рисунке 3: можно отметить, что максимум КПД водометного движителя составляет  $\eta_{max} \approx 0.68$ . Полученная эффективность сопоставима с эффективностью гребных винтов в открытой воде, что подтверждает актуальность поставленной задачи. На швартовах и при малых значениях поступи направляющая насадка и спрямляющий аппарат имеют тягу  $K_{TD}$ >0, а начиная с поступи J>0.5, величина  $K_{TD}$ <0. На рисунке 3 сплошными линиями обозначены результаты, измеренные в свободной воде, а именно гидродинамические характеристики водомета в виде зависимостей V

от поступи  $J = \frac{V}{nD}$ , где V – скорость обтекания водомета, м/с; n – число оборотов рабочего

колеса, об/с, ряда параметров:

K<sub>TT</sub> = K<sub>T</sub> + K<sub>TD</sub> - коэффициент упора движителя;

Кт-коэффициент упора рабочего колеса;

К<sub>Q</sub> – коэффициент момента рабочего колеса;

η – КПД движителя.

Здесь 
$$\eta = \frac{J}{2\pi} \cdot \frac{K_{TT}}{K_Q}$$
  $K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4};$   $K_{TD} = \frac{T_D}{\rho n^2 D^4};$   $K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5};$ 

где  $\rho$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;

Т – упор рабочего колеса, Н;

T<sub>D</sub> – упор на не вращающейся части водомета (спрямляющий аппарат, насадка, обтекатель спрямляющего аппарата), H; Q – момент на рабочем колесе, H\*м.

2,4 K<sub>T</sub>, K<sub>td</sub> **К**<sub>тт</sub>, 2,0 10 K<sub>Q</sub> 1.8 η 1,6 в опытовом басс СКТ при атмосферном давлении 1.4 1,2 1.0 0,8 0,6 η 0.4 0,2 0.0 -0.2 -0,4 0.2 0.4 1,0 1,2 1,4 1,6 1,8 2.0 **J** 2,2 0.0 0.6 0.8 2,4

Рисунок 3. Гидродинамические характеристики базовой версии водометного движителя насосного типа

Также в главе описаны экспериментальные исследования модели базовой версии ВДНТ, которые проводились в средней кавитационной трубе (СКТ) Крыловского государственного научного центра. Испытания проводились для определения кавитационных характеристик движителя. Данные, полученные при атмосферном давлении, приведены на рисунке 3 и близки к значениям, полученным в глубоководном бассейне. Далее исследовались условия возникновения второй стадии кавитации (отвалы), а также условия возникновения (исчезновения) различных видов кавитации (квазиакустика).

Исследования модели водометного движителя с целью определения условий возникновения второй стадии кавитации проводились при ряде значений числа кавитации:  $\sigma_0 = 0.4, 0.6, 0.7, 0.8, 1.0, 1.1, 1.3, 1.5, 2.0$ . Результаты испытаний в СКТ при различных числах кавитации приведены на рисунке 4. Видно, что при числах кавитации  $\sigma_0 = 0.4, \sigma_0 = 0.6$  гидродинамические характеристики «не притыкаются» к значениям при атмосферном давлении для всех рассмотренных значений поступи J.

Результаты испытаний базовой версии ВДНТ по условиям возникновения второй стадии кавитации (отвалы) приводит к следующей зависимости критического значения нагрузки ВДНТ от числа кавитации  $C_T = 1.261 \cdot (\sigma_0 * A_E/A_O)$ . При этом число кавитации  $\sigma_0$  вычисляется по формуле  $\sigma_0 = (p - p_v) / (\frac{\rho V^2}{2})$ , где p –давление в рабочем участке СКТ,  $H/m^2$ ,  $p_v$  – давление насыщенных паров воды,  $H/m^2$ . Анализ приведенного соотношения показывает, что запасы по

второй стадии кавитации представляются вполне достаточными для практического применения ВДНТ.





Результаты квазиакустических испытаний для базовой версии водометного движителя приведены на рисунке 5.



Рисунок 5. Результаты квазиакустических испытаний модели базовой версии ВДНТ

Анализируя полученные результаты квазиакустических испытаний, важно отметить наличие кавитации от концевого вихря и кромочной кавитации на лопасти рабочего колеса, которые появляются при самых высоких значениях числа кавитации  $\sigma_n$  при рабочих поступях. Здесь  $\sigma_n = \frac{2(P - P_v)}{\rho(\pi^*n^*D)^2}$  — число кавитации по окружной скорости. Далее следует отметить наличие кавитации на носовой оконечности насадки, которая присутствует на всех исследуемых поступях работы водометного движителя. А именно наличие кавитации на насадке до значений поступи J = 1.05 мы видим на засасывающей стороне, далее насадка кавитирует при постоянном значении  $\sqrt{\sigma_n} \approx 0.6$ , в том числе при рабочем значении поступи J = 1.5–1.6, далее кавитирует

нагнетающая сторона насадки при поступи более J = 1.65. Данные негативные явления необходимо убрать путем совершенствования в геометрии элементов базовой версии ВДНТ.

Для анализа локальных характеристик течения сотрудниками 12 отделения Крыловского государственного научного центра было выполнено компьютерное моделирование работы ВДНТ, которое позволило дополнить данные о явлениях, обнаруженных при экспериментальном исследовании, и изучить локальные характеристики.

Результаты компьютерного моделирования приведены на рисунке 6 в виде картины распределения скоростей. Анализ данных расчетов выявил наличие неблагоприятных зон течения. А именно отрывные явления на кормовом обтекателе спрямляющего аппарата и конце направляющей насадки.



Рисунок 6. Векторная диаграмма распределения скоростей около базовой версии ВДНТ

Таким образом, выполненные в главе 1 исследования определяют направления совершенствования в геометрии элементов базовой версии:

- Корректировка сегментной формы лопасти рабочего колеса с целью устранения кромочной кавитации и кавитации концевого вихря.

- Изменение сегментной формы профиля сечения направляющей насадки с целью устранения кавитационных и отрывных явлений, возникающих на ней при работе водометного движителя.

- Корректировка формы кормового обтекателя с целью устранения на нем отрывных явлений, возникающих при работе водометного движителя.

Дальнейшие работы по совершенствованию конструкции ВДНТ, посвящены устранению выявленных особенностей на кормовом обтекателе и на внешней стороне насадки, а также устранению аномалий обтекания лопастей рабочего колеса. Эти работы необходимо выполнить с целью повышения КПД водометного движителя, а также улучшения его кавитационных характеристик.

Во второй главе выполнена работа по совершенствованию геометрических характеристик ВДНТ, направленная на устранение дефектов гидродинамических и кавитационных характеристик его базовой версии, также выполнен расчет с помощью CFD методов для анализа локальных характеристик течения при работе водометного движителя с откорректированной геометрией.

С целью улучшения кавитационных и гидродинамических характеристик было решено внести изменения в форму сегментного профиля сечения лопастей рабочего колеса и спрямляющего аппарата базовой версии водометного движителя.

По данным исследования о гидродинамических характеристиках профилей в вязкой несжимаемой жидкости (Г. И. Каневский, С. В. Капранцев, А. В. Пустошный, А. А. Самаркина,

2011), получено, что профиль NACA-66 mod a = 08 среди прочих профилей показывает хорошие кавитационные характеристики. Поэтому для анализа возможного применения новой геометрии профиля для лопастей водометного движителя был предложен профиль NACA-66 mod a = 08.

В данной работе анализировались гидродинамические характеристики профилей с относительной толщиной  $\delta = 0.057$  и относительной кривизной  $\delta_C = 0.0225$ . На рисунке 7 представлена сегментная форма профиля, принятая на базовой версии ВДНТ, и форма профиля NACA-66 mod a = 08.



Рисунок 7. Форма профилей сегментного и NACA-66 mod a = 08

Для выполнения расчета гидродинамических характеристик профиля в вязкой несжимаемой жидкости использован метод расчета (Г. И. Каневский, В. В. Дробленков, 1982), который базируется на разделении потока несжимаемой жидкости, обтекающей профиль, на вязкую и идеальную зоны течений. Характеристики течения в идеальной зоне определяются по методу конформных отображений с учетом вытеснения, вызванного замедлением жидкости в вязкой зоне течения.

Вязкая часть течения реализуется в турбулентном пограничном слое и следе за профилем. Подъемная сила профиля определяется из модернизированного на влияние вязкости условия Кутта-Жуковского. Сопротивление профиля определяется интегрированием дефекта импульса в дальнем следе за профилем. По результатам расчета определяются следующие характеристики обтекания профиля вязкой несжимаемой жидкостью:

- коэффициент подъемной силы C<sub>L</sub>;

- коэффициент сопротивления профиля C<sub>D</sub>;

- распределение коэффициента давления по нагнетающей и засасывающей стороне профиля. Результаты расчета коэффициентов сопротивления  $C_D$  и подъемной силы  $C_L$  приведены на рисунке 8.



Рисунок 8. Результаты расчета коэффициентов сопротивления С<sub>D</sub> и подъемной силы С<sub>L</sub>

Анализируя полученные материалы, можно отметить, что значения коэффициентов сопротивления  $C_D$  и подъемной силы  $C_L$  практически совпадают для сегментного профиля и NACA-66 mod a = 08 для всех расчетных режимов обтекания. Таким образом, следует ожидать, что применение новой формы профиля лопастей рабочего колеса и спрямляющего аппарата не приведет к снижению эффективности работы водометного движителя насосного типа.

Для оценки кавитационных качеств различных профилей по результатам расчета определялось минимальное значение коэффициента давления на нагнетающей и засасывающей сторонах профилей при различных значениях коэффициента подъемной силы C<sub>L</sub>. Результаты данного расчета представлены на рисунке 9.

По результатам расчетов получено, что для сегментного профиля значение коэффициента минимального давления ниже, чем для профиля NACA-66 mod a = 08. Это наблюдается при всех значениях коэффициента подъемной силы C<sub>L</sub>. Так, по результатам расчета, величина коэффициента минимального давления  $\overline{P}$ min в вязкой несжимаемой жидкости для натурных условий при значении коэффициента подъемной силы C<sub>L</sub>= 0.63 на засасывающей стороне составляет -  $\overline{p_{min}} = 1.6$  для профиля NACA-66 mod a = 08, а для сегментного профиля -  $\overline{p_{min}} = 7.1$ . Следовательно, применение откорректированной формы профиля повышает минимальное значение коэффициента давления более чем в 4 раза.

На основании выполненных расчетов для гидродинамических характеристик профилей следует ожидать, что применение откорректированной формы сечения профиля лопасти рабочего колеса и спрямляющего аппарата ВДНТ должно улучшить кавитационные характеристики водометного движителя.





 $Rn=2.8*10^7$ 

Следующим направлением исследования с целью улучшения кавитационных характеристик было устранение кавитации на передней кромке насадки водометного движителя. Было решено внести изменения в форму сегментного профиля сечения направляющей насадки, принятую на базовой версии ВДНТ.

Методом исследования является расчет гидродинамических характеристик профилей различной геометрии бесконечного размаха в несжимаемой жидкости (Г. И. Каневский, В. В. Дробленков, 1982). Расчеты выполнены для условий, соответствующих работе профиля в безграничной идеальной жидкости.

В связи с тем, что применение ВДНТ предполагается за корпусом судна, в поток жидкости при обтекании движителя вносится сильная неоднородность. Вследствие наличия неоднородности возникают углы скоса потока жидкости. Поэтому при работе ВДНТ насадка обтекается под различными углами атаки. По результатам компьютерного моделирования обтекания ВДНТ за корпусом судна, выполненного Д. В. Багаевым (2014), получено, что насадка в реальных условиях может обтекаться под отрицательными углами атаки, достигающими значений  $\alpha = -7-9$  градусов. В связи с этим были выполнены расчеты для случая обтекания плоского профиля насадки в диапазоне различных углов атаки, от отрицательных до положительных значений.

В диссертационной работе Н. В. Маринича (2016) были выполнены проработки и получены рекомендации по форме входящей кромки сечения направляющей насадки. Кроме того, были внимательно рассмотрены характеристики профиля сечения, предложенного

К. В. Александровым и спрофилированного по форме каверны. Сочетание этих двух источников откорректированную позволило разработать форму сечения направляющей насадки. Откорректированный, финальный профиль насадки имеет несколько отличительных особенностей. Во-первых, увеличенный радиус входящей кромки; во-вторых, увеличенный радиус входящей кромки соединен плавной линией с телом профиля. Линия соединения была построена с использованием математического аппарата сглаживания вторых производных. При таком построении профиль не имел разрывов кривизны. Стоит отметить, что внутренняя сторона профилей насадки является плоской в связи с конструктивными особенностями работы водомета для всех 3-х исследуемых профилей.





Рисунок 10. - Форма профилей насадки. Масштаб осей Y/X = 1/2

Результаты расчета распределения коэффициента давления  $\overline{P}$  на нагнетающей и засасывающей стороне профиля приведены на рисунках 11–12. Видно, что для положительного значения угла атаки распределение давления для профилей Н. В. Маринича и финального имеют примерно одинаковый характер. Для сегментного профиля наблюдается заметный пик разряжения в носовой оконечности. Для отрицательного значения угла атаки для профиля Н. В. Маринича имеется заметный пик разряжений на нагнетающей стороне.













Указанные особенности привели к решению о применении именно финального профиля для откорректированной формы направляющей насадки ВДНТ.

Следующим направлением исследования было совершенствование формы кормового обтекателя. Анализ результатов расчета базовой версии ВДНТ показал, что на кормовом обтекателе спрямляющего аппарата наблюдаются отрывные явления. Для устранения отрывных явлений было решено сделать форму кормового обтекателя более плавной и придать ей S-образность. Принятая форма кормового обтекателя приведена на рисунке 13.

Для всесторонней проверки эффективности внесенных изменений и анализа локальных гидродинамических характеристик было выполнено математическое моделирование работы ВДНТ. В этом случае диаметр рабочего колеса составлял D = 233 мм, что соответствует модели ВДНТ, использованной в эксперименте, а форма сечения лопастей ВДНТ соответствует NACA-66 mod a = 08. Форма кормового обтекателя ВДНТ откорректирована. Форма направляющей насадки – сегментная, коэффициент поджатия  $\beta = 0.666$ .

В данном расчете в качестве рабочего инструмента используется коммерческий пакет вычислительной гидродинамики Star-CCM+, разработанный фирмой Siemens, версии 10. Задача решается в нестационарной постановке со схемами второго порядка для дискретизации по пространству. В результате расчета были определены локальные характеристики при работе водометного движителя с откорректированной формой его элементов. Полученная картина распределения скоростей при работе ВДНТ, представленная на рисунке 13 позволяет отметить отсутствие отрывных явлений на кормовом обтекателе спрямляющего аппарата.



Рисунок 13. Векторная диаграмма распределения скоростей около откорректированной версии ВДНТ

По результатам исследований, приведенных в главе 2, выполнено совершенствование геометрических элементов водометного движителя насосного типа, направленное на устранение дефектов гидродинамических и кавитационных характеристик, присущих его базовой версии, а именно:

- Предложена профилировка лопастей рабочего колеса и спрямляющего аппарата, направленная на улучшение гидродинамических и кавитационных характеристик.

- Предложена откорректированная форма направляющей насадки.

- Предложена откорректированная форма кормового обтекателя ВДНТ.

- Выполнено математическое моделирование работы ВДНТ в конфигурации геометрии с профилировкой лопастей NACA-66 mod a = 08 и откорректированной формой обтекателя спрямляющего аппарата. Анализ результатов расчета показал отсутствие отрывных явлений на кормовом обтекателе спрямляющего аппарата.

**В** третьей главе содержатся результаты экспериментального исследования гидродинамических и кавитационных характеристик водометного движителя насосного типа с усовершенствованными геометрическими элементами.

С целью оценки влияния внесенных в конструкцию ВДНТ изменений на гидродинамические и кавитационные характеристики было проведено экспериментальное исследование. Для проведения испытаний были изготовлены две модели ВДНТ с откорректированными элементами.

Обе модели ВДНТ имеют рабочее колесо и спрямляющий аппарат с сечениями лопастей, соответствующими профилю NACA-66 mod a = 08, и откорректированную форму кормового обтекателя. В связи с особенностями условия проведения эксперимента модели ВДНТ изготовлены с диаметром рабочего колеса D = 233 мм. При этом первая имеет сегментную форму сечения направляющей насадки и коэффициент поджатия  $\beta$  = 0.666. Схема первой модели ВДНТ приведена на рисунке 14.



Рисунок 14. Схема первой модели водометного движителя

Испытания первой модели ВДНТ проводились в свободной воде в глубоководном опытовом бассейне. Результаты этих испытаний приведены на рисунке 15. Анализируя эти данные, можно отметить, что максимальное значение КПД для первой модели ВДНТ составило  $\eta = 0.70$ . Сравнивая эти результаты с материалами, полученными ранее, можно отметить, что первая модель ВДНТ имеет КПД на 0.02 выше (~3%), чем у базовой версии ВДНТ. Полученный результат подтверждает правильность решения по изменению формы сечения лопастей и корректировке формы кормового обтекателя.



Рисунок 15. Кривые действия первой модели ВДНТ в «свободной воде». Рабочее колесо № 8268 (правое)

Далее были проведены испытания первой модели ВДНТ в СКТ. Исследовались условия возникновения второй стадии кавитации (отвалы), а также условия возникновения (исчезновения) различных видов кавитации (квазиакустика).

Результаты испытаний первой модели ВДНТ по условиям возникновения второй стадии кавитации (отвалы) приводит к следующей зависимости критического значения нагрузки ВДНТ от числа кавитации  $C_T = 1.175 \cdot (\sigma_0 * A_E/A_O)$ .

Анализ приведенного соотношения показывает, что для первой модели ВДНТ запасы по второй стадии кавитации несколько меньше, чем для базовой версии ВДНТ, но эти запасы представляются вполне достаточными для практического применения ВДНТ.

На рисунке 16 приводятся результаты квазиакустических испытаний первой модели ВДНТ. Анализ представленных материалов показывает, что на рабочих поступях ВДНТ присутствует только щелевая кавитация. На малых и больших поступях появляется также кавитация на наружной и внутренней стороне носовой оконечности направляющей насадки.

Эти результаты также подтверждают правильность применения предложенной формы сечения лопастей NACA-66 mod a = 08. Кромочная кавитация и кавитация концевого вихря, наблюдаемые для базовой версии ВДНТ, исчезли полностью.



Рисунок 16. Результаты квазиакустических испытаний первой модели ВДНТ

Вторая модель ВДНТ в отличие от первой имеет откорректированную форму сечения направляющей насадки и коэффициент поджатия  $\beta = 0.752$ . Для этого было уменьшен диаметр ступицы спрямляющего аппарата (CA), при этом лопасти спрямляющего аппарата были увеличены по высоте без изменения формы сечения лопастей.

Испытания второй модели ВДНТ в «свободной воде» проводились в глубоководном опытовом бассейне. Результаты этих испытаний приведены на рисунке 17. Анализируя полученные данные, можно отметить, что максимальное значение КПД составило  $\eta = 0.711$ ; J = 1.5, что на 1.5 % больше, чем для первой модели ВДНТ, и на 5 % больше по сравнению с базовой версией ВДНТ.



Далее были проведены испытания второй модели ВДНТ в СКТ. Исследовались условия возникновения второй стадии кавитации (отвалы), а также условия возникновения (исчезновения) различных видов кавитации (квазиакустика).

Результаты испытаний второй модели ВДНТ по условиям возникновения второй стадии кавитации (отвалы) приводят к следующей зависимости критического значения нагрузки ВДНТ от числа кавитации:  $C_T = 0.702^*(\sigma_0 * A_E/A_O)$ .

Анализ приведенного соотношения показывает, что для второй модели ВДНТ запасы по второй стадии кавитации заметно меньше, чем для базовой версии ВДНТ, эти запасы представляются недостаточными для практического применения ВДНТ.

На рисунке 18 приводятся результаты квазиакустических испытаний первой модели ВДНТ. Видно, что корректировка формы направляющей насадки привела к исчезновению кавитационных явлений на наружной и внутренней стороне носовой оконечности направляющей насадки. Эти результаты подтверждают правильность перехода от формы сегментного профиля насадки на предложенный финальный профиль. Снижение поджатия привело к поднятию кавитационной корзины при рабочих поступях до значений числа кавитации  $\sqrt{\sigma_n} = 0.8$ . Кроме того, появилась кавитация на нагнетающей поверхности лопастей рабочего колеса.

Таким образом, видно, что уменьшение поджатия привело к росту КПД на 1.5 %, но при этом произошло резкое ухудшение кавитационных характеристик. Поэтому представляется целесообразным сохранить на ВДНТ коэффициент поджатия  $\beta = 0.666$ , но использовать откорректированную форму направляющей насадки для улучшения кавитационных характеристик.



Рисунок 18. Результаты квазиакустических испытаний второй модели ВДНТ

В результате работ, выполненных в главе 3, проведено экспериментальное исследование гидродинамических и кавитационных характеристик ВДНТ с усовершенствованными геометрическими элементами, а именно:

- Для проведения испытаний были изготовлены две модели ВДНТ.

- Проведены в «свободной воде» испытания первой модели ВДНТ с профилировкой лопастей NACA-66 mod a = 08 и откорректированной формой кормового обтекателя, которые показали рост КПД до значений  $\eta = 0.7$ . Проведены испытания первой модели ВДНТ в средней кавитационной трубе, которые показали исчезновение кромочной кавитации и кавитации концевого вихря.

Проведены в «свободной воде» испытания второй модели ВДНТ с откорректированной формой профиля направляющей насадки и коэффициентом поджатия  $\beta = 0.752$ , профилировкой лопастей NACA-66 mod a = 08 и откорректированной формой кормового обтекателя. Результаты этих испытаний показали дополнительный рост КПД до значений  $\eta = 0.71$ . Проведенные испытания данной конфигурации ВДНТ в СКТ подтвердили исчезновение кавитации на насадке. Кроме того, при переходе к величине коэффициента поджатия  $\beta = 0.752$  произошло резкое ухудшение кавитационных характеристик. Поэтому представляется целесообразным сохранить на ВДНТ коэффициент поджатия  $\beta = 0.666$ , но использовать откорректированную форму направляющей насадки для улучшения кавитационных характеристик.

Таким образом, в результате выполненного в главе 3 исследования подтверждено улучшение гидродинамических характеристик ВДНТ с усовершенствованными геометрическими элементами. При этом получен рост КПД на 3–5 % по сравнению с базовой версией, а также улучшены кавитационные характеристики.

**В четвертой главе** представлено экспериментальное исследование гидродинамических и кавитационных характеристик **серии** водометных движителей насосного типа с усовершенствованными геометрическими элементами.

С целью дальнейшего применения ВДНТ на реальных судах и кораблях, а также для анализа гидродинамических характеристик была проведена работа по проектированию серии из 3 рабочих колес. При переходе к большему или меньшему шагу рабочего колеса меняется зависимость кривизны от радиуса и шага от радиуса.

По результатам экспериментальных данных, наиболее эффективный режим работы водометного движителя с усовершенствованными геометрическими элементами реализуется при поступи J = 1.5-1.6. Поэтому в рамках теории идеальной жидкости были спроектированы 3 рабочих колеса применительно к значению упора ВДНТ  $K_{TT} = 0.45$  при трех значениях поступи 1.2; 1.6; 2.0 при величине дискового отношения Ae/Ao = 0.709.

Полученные в рамках теории идеальной жидкости результаты расчетов показали тенденции изменения распределения кривизны вдоль лопасти рабочего колеса для разных шагов. В связи с установленными тенденциями при уменьшении шагового отношения P/D кривизна уменьшается, а при увеличении – кривизна не меняется.

Серия была разработана таким образом, что одно из рабочих колес соответствует принятому в главах 2 и 3. Для него максимум КПД достигается при поступи J = 1.6, при этом шаговое отношение  $P/D_{0.9} = 1.74$ , соответственно  $P/R_{0.9} = 3.47$ .Для одного из спроектированных рабочих колес максимум КПД ожидается при поступи J = 1.2, при этом шаговое отношение  $P/D_{0.9} = 1.5$ , соответственно  $P/R_{0.9} = 3.013$ . Для второго из спроектированных рабочих колес максимум КПД ожидается при поступи J = 2.0, при этом шаговое отношение  $P/D_{0.9} = 2.06$ , соответственно  $P/R_{0.9} = 4.113$ . На рисунке 19 приведено распределение шагового отношения от радиуса рабочего колеса для серии из трех рабочих колес.



Рисунок 19. Зависимость шагового отношения P/R от безразмерного радиуса <sup>т</sup>

В ходе разработки серии рабочих колес для ВДНТ были изготовлены два новых рабочих колеса № 8374 и № 8375.

Рабочее колесо № 8374 соответствует геометрии, при которой максимум КПД ожидается при поступи J = 1.2, при этом шаговое отношение винта  $P/D_{0.9} = 1.5$ . Для рабочего колеса № 8375 максимум КПД ожидается при поступи J = 2.0 при этом шаговое отношение  $P/D_{0.9} = 2.06$ .

Контрольные испытания серии водометных движителей с коэффициентом поджатия  $\beta = 0.666$  и сегментной формой насадки были проведены в «свободной воде». Все испытания проводились от поступи J = 0 до поступи нулевого упора. На рисунке 20 представлены результаты этих испытаний. Из приведенных данных видно, что смена рабочего колеса не изменила максимального значения эффективности, но привела к смещению поступи максимального КПД. Это позволяет применять водометный движитель при проектировании судов на различные режимы эксплуатации.



Рисунок 20. Сравнительные результаты испытаний в свободной воде серии ВДНТ

Результаты испытаний в опытовом бассейне были использованы для построения диаграмм гидродинамических характеристик в форме Э. Э. Папмеля. Значения коэффициентов упора и момента на рабочих колесах были аппроксимированы степенными полиномами по методу наименьших квадратов с весовыми коэффициентами. Диаграмма для зависимости K<sub>TT</sub>-J приведена на рисунке 21. Эта диаграмма может быть использована при практическом определении шагового отношения рабочего колеса ВДНТ.



Рисунок 21. Диаграмма Ктт-Ј в форме Э. Э. Папмеля для серии ВДНТ

В дополнение к исследованию гидродинамических характеристик водометного движителя была выполнена апробация макета движительного комплекса, состоящего из 2 ВДНТ, на полунатурном судне. Макет движительного комплекса изготовлен ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Испытания полунатурного судна были проведены на полигоне испытательной базы ОАО «ЦМКБ «Алмаз».

Фотографии полунатурного судна на ходовых испытаниях приведены на рисунке 22.



Рисунок 22. Фото полунатурного судна на ходовых испытаниях

По результатам полунатурных испытаний подтверждена надежная работа ВДНТ на переднем ходу; на «тихой воде» и на волнении, на прямом курсе и на циркуляции.

В итоге работ, описанных в главе 4, выполнено экспериментальное и теоретическое исследование гидродинамических и кавитационных характеристик **серии** водометных движителей насосного типа с усовершенствованными геометрическими элементами, а именно:

- Проведена работа по проектированию серии из 3 рабочих колес применительно к значению упора K<sub>TT</sub> = 0.45 при трех значениях поступи 1.2; 1.6; 2.0.

- Проведены контрольные испытания серии водометного движителя в «свободной воде» с тремя вариантами рабочего колеса и спрямляющим аппаратом с коэффициентом поджатия  $\beta = 0.666$ .

- Результаты испытаний в опытовом бассейне были использованы для построения диаграмм гидродинамических характеристик серии ВДНТ в форме Э. Э. Папмеля. Данные диаграммы построены для зависимости К<sub>тт</sub>-J и К<sub>Q</sub>-J.

- По результатам полунатурных испытаний подтверждена надежная работа ВДНТ на переднем ходу; на «тихой воде» и на волнении, на прямом курсе и на циркуляции.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

- 1. Определены направления совершенствования в геометрии элементов базовой версии ВДНТ путем проведения экспериментального и теоретического исследования гидродинамических и кавитационных характеристик.
- 2. Предложена профилировка лопастей рабочего колеса и спрямляющего аппарата, направленная на улучшение гидродинамических и кавитационных характеристик базовой версии ВДНТ.
- 3. Предложены откорректированная форма направляющей насадки и форма кормового обтекателя ВДНТ. Выполнено экспериментальное и теоретическое исследование гидродинамических и кавитационных характеристик ВДНТ с усовершенствованными геометрическими элементами, которые показали рост КПД на 3–5 % по сравнению с базовой версией, а также исчезновение нескольких видов кавитации.
- 4. Разработана серия ВДНТ, для которой выполнено экспериментальное исследование гидродинамических и кавитационных характеристик. Наличие серии ВДНТ позволяет проектировать водометный движитель с учетом реальных условий работы.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Работы, опубликованные в научных рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК:

- 1. Александров С. А., Каневский Г. И. Оптимизация элементов водометного движителя насосного типа с коротким водоводом // Труды Крыловского государственного научного центра. 2015. № 90 (374) .С. 11–18.
- 2. Александров С. А., Каневский Г. И., Капранцев С. В., Пустошный А. В. Легконагруженный водометный движитель // Патент Российской Федерации на изобретение РФ № 2537351 от 07 мая 2013.
- 3. Александров С.А. Совершенствование сечения лопастей водометного движителя // Труды Крыловского государственного научного центра. 2017. № 3 (381). С. 9–14.
- 4. Александров С. А. Совершенствование профиля насадки водометного движителя // Труды Крыловского государственного научного центра. 2017. № 4 (382). С. 40–45.

# Публикации в других изданиях:

- 1. Александров С. А. Экспериментальное исследование формы насадки водометного движителя и ее влияния на гидродинамические характеристики //Аннотация к докладу на 15 школе-семинаре «Модели и методы аэродинамики» ЦАГИ им Жуковского. 2015.
- 2. Александров С. А., Багаев Д. В. Анализ гидродинамических характеристик водометного движителя по результатам численного моделирования // Тезисы докладов Конференции молодых ученых и специалистов Крыловского государственного научного центра. 2015.
- 3. Александров С. А., Мещевцева А. А. Экспериментальные исследования влияния направляющей насадки на гидродинамические характеристики водометного движителя // Тезисы докладов конференции «Российское кораблестроение от академика А. Н. Крылова до наших дней». 2014.