

На правах рукописи



АБДУЛИН Арсен Яшарович

**МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОЧЕГО
ПРОЦЕССА ВОДОМЕТНЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ
СКОРОСТНЫХ СУДОВ**

**Специальность:
05.04.13 – Гидравлические машины
и гидропневмоагрегаты**

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Уфа – 2014

Работа выполнена на кафедре «Прикладная гидромеханика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Месропян Арсен Владимирович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент
Модорский Владимир Яковлевич
ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», профессор кафедры «Механика композиционных материалов и конструкций»

кандидат технических наук
Хаит Анатолий Вильич
ФГБАУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», строительный институт, старший преподаватель кафедры «Гидравлика»

Ведущая организация: ФГБУН «Институт механики имени Р. Р. Мавлютова» Уфимского научного центра РАН

Защита диссертации состоится 25 июня 2014 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.298.02 на базе ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ) по адресу:

454080, г. Челябинск, пр. им. В. И. Ленина, д. 76, ауд. 1001.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ).

Автореферат разослан 6 мая 2014 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор техн. наук, профессор



А. О. Чернявский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Повышение требований к энергоэффективности современных скоростных судов обуславливает необходимость совершенствования рабочих процессов их движителей и энергетических установок. Энергоэффективность гребных винтов (ГВ) понижается на высоких скоростях движения (более 50...60 км/ч), а их использование на обмелевших и замусоренных водоемах становится, зачастую, невозможным или опасным для жизни. Водометные движители (ВД) с лопастными насосами обладают преимуществами перед другими типами движителей, т.к. они обеспечивают высокие значения КПД судна (на скоростях более 60...70 км/ч), безопасность эксплуатации, более низкие уровни шума (на 6–10 дБ) по сравнению с ГВ, высокую маневренность, приемистость, проходимость по мелководью и обладают меньшей склонностью к кавитации на высоких скоростях движения.

Создание ВД требует решения комплекса задач, направленных на разработку новых схемных решений системы «ВД – судно», оптимизацию геометрических параметров и совершенствование рабочего процесса.

Выбор наиболее эффективной схемы компоновки «ВД – судно» зависит от геометрии обводов судна, скорости движения, условий эксплуатации и определяет дополнительное сопротивление движению судна, условия работы лопастного насоса, тяговые и мощностные характеристики ВД.

Рабочий процесс ВД представляет собой трехмерное (3D) течение вязкого турбулентного несжимаемого потока в проточной части сложной геометрии и характеризуется одновременным протеканием ряда гидродинамических процессов. При моделировании рабочего процесса учитывается выброс жидкости в неограниченное пространство, образование паровых кавитационных каверн, отрыв потока от стенок проточной части, течение в радиальном зазоре на лопастях рабочего колеса (РК).

Широкое распространение при расчетах параметров рабочего процесса ВД получили приближенные одномерные и двухмерные эмпирические модели, численное 3D-моделирование и физические эксперименты.

Вопросам совершенствования рабочих процессов ВД и лопастных насосов посвящены работы многих отечественных и зарубежных авторов. Среди них в области ВД следует выделить труды А. Н. Папира, Ю. М. Войнаровского, А. М. Басина, Е. Г. Хорхордкина, С. В. Куликова, М. Ф. Храмкина, В. Ф. Васильева, А. Ю. Яковлева, *Norbert Bulten*, *John Carlton*, в области лопастных насосов – Б. В. Овсянникова, Л. И. Степанова, Г. В. Викторова, в области кавитации – *Ashok K. Singhal*, *Farid Bakir*, в области турбулентности – А. А. Юна. В работах отечественных ученых предложены одномерные и двухмерные методы расчета рабочего процесса ВД с лопастными насосами, а также эмпирические зависимости интегральных параметров. В работах зарубежных авторов, посвященных 3D-моделированию рабочего процесса ВД, недостаточно подробно рассмотрены вопросы влияния неустановившегося течения, паровой кавитации и неравномерности потока на характеристики ВД, не приводятся рекомендации по построению геометрической 3D-модели проточной

части водовода, рабочих колес оседиагонального типа и осевого спрямляющего аппарата (СА).

Таким образом, исследование и совершенствование рабочего процесса ВД, направленное на снижение объемов доводочных испытаний, а также разработка методики 3D-моделирования рабочего процесса и оптимизации геометрических параметров является актуальной задачей.

Цель и задачи исследования. Целью работы является совершенствование рабочего процесса водометных движителей с осевыми и оседиагональными насосами и разработка методики моделирования рабочего процесса. Исходя из цели работы, для ее реализации были сформулированы следующие задачи:

1. Аналитический обзор схемных решений ВД. Анализ работ по проблемам моделирования рабочего процесса ВД.

2. Численное моделирование рабочего процесса ВД с учетом влияния геометрических параметров проточной части, паровой кавитации, нестационарности потока, неравномерности полей скоростей и давлений на входе в РК.

3. Экспериментальное исследование рабочего процесса ВД и верификация математической модели.

4. Разработка методики моделирования рабочего процесса ВД с осевыми и оседиагональными насосами, позволяющей моделировать влияние геометрических параметров проточной части, нестационарности потока, паровой кавитации и неравномерности на параметры рабочего процесса и рассчитывать интегральные характеристики ВД.

Методы исследования. Работа выполнена с использованием классических методов механики жидкости и газа, методов численного решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений и систем уравнений в частных производных, теории лопастных гидронасосов, методов экспериментального исследования.

Научная новизна. Новыми научными результатами, полученными в работе, являются результаты численного моделирования рабочего процесса ВД, физических экспериментов, а также методика моделирования, направленные на повышение эффективности рабочего процесса и сокращение объемов доводочных испытаний:

1. Результаты численного моделирования рабочего процесса ВД, отличающиеся тем, что исследовано влияние геометрии проточной части на параметры рабочего процесса, получены тяговые характеристики ВД и характеристики осевых и оседиагональных насосов с учетом возникновения паровой кавитации, нестационарности и неравномерности потока.

2. Результаты экспериментальных исследований ходовой лаборатории на базе глиссирующего катера FreeRider-490C-Jet с ВД и верификации математической модели рабочего процесса, отличающиеся тем, что для данного катера и ВД впервые были рассчитаны ходовые характеристики, и по результатам верификации отлажена численная модель задачи, обоснована модель турбулентности, скорректированы коэффициенты конденсации и испарения в модели кавитации Рэлея-Плессета.

3. Методика моделирования рабочего процесса ВД, которая, в отличие от существующих, позволяет моделировать влияние геометрических параметров проточной части, паровой кавитации, нестационарности и неравномерности потока на параметры рабочего процесса и рассчитывать интегральные характеристики.

Практическая ценность. Результаты численного моделирования и физических экспериментов, разработанные математическая модель и методика моделирования рабочего процесса ВД внедрены на ООО НПП «Мастер-Мотор» и в учебный процесс ФГБОУ ВПО «УГАТУ». Разработанная математическая модель, результаты исследований и методика имеют практическую ценность и позволяют:

1. Проводить моделирование рабочего процесса ВД в 3D квазистационарной и нестационарной постановке с учетом влияния геометрических параметров проточной части, неравномерности полей скоростей и давлений перед РК, паровой кавитации.

2. Исследовать влияние геометрических параметров проточной части для получения максимальной энергоэффективности, рассчитывать интегральные параметры рабочего процесса ВД, оценивать влияние паровой кавитации, нестационарности и неравномерности потока на эти параметры.

3. Проводить физические эксперименты по определению тяги ВД, поля давлений в основных сечениях ВД и осуществлять верификацию математической модели рабочего процесса ВД.

Достоверность представленных результатов подтверждена верификацией по данным физических экспериментов, полученных на ходовой лаборатории в составе глиссирующего катера FreeRider-490C-Jet с ВД при участии автора, (ООО НПП «Мастер-Мотор», Уфа) и в лаборатории Center for Maritime Systems – CMS (США, Нью-Джерси, Хобокен).

Основание для работы. Основанием для выполнения данной работы является грант ФЦП на 2010–2012 г. «Экспериментально-теоретические методы проектирования и доводки судовых силовых установок и двигателей для судов различного типа и назначения» и совместные поисковые научно-исследовательские работы с ООО НПП «Мастер-Мотор».

Положения, выносимые на защиту:

1. Расчетная модель рабочего процесса ВД в пакете ANSYS CFX на швартовых и скоростных режимах работы с учетом нестационарности, неравномерности потока и паровой кавитации.

2. Методика построения 3D-моделей осевых и оседиагональных РК с лопастями переменного шага.

3. Результаты верификации модели турбулентности и модели паровой кавитации на основе данных физических экспериментов.

4. Результаты расчетов тяговых характеристик ВД и характеристик лопастных насосов ВД.

5. Методика моделирования рабочего процесса ВД скоростных судов.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы обсуждались и докладывались на Всероссийской научно-технической конференции «Зимняя

школа аспирантов» (Уфа, 2013 г.); Всероссийской молодежной НТК «Мавлютовские чтения» (Уфа, 2012-2013 г.); Всероссийской выставке «Политехника» (Москва, 2013 г.); 7-м Всероссийском форуме молодых ученых (Санкт-Петербург, 2013 г.).

Публикации. По тематике диссертационной работы опубликовано 11 печатных работ, в том числе 4 публикации в центральных рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и выводов. Содержит 160 страниц машинописного текста, библиографический список из 75 наименований, приложения.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы исследования, посвященной совершенствованию рабочих процессов ВД, формулируется цель работы, основные направления исследований, приводятся выносимые на защиту положения, апробация, структура и краткое содержание работы по главам.

В первой главе проведен анализ проблемы исследований, поставлены цели и задачи работы. Проведена классификация современных судовых двигателей (рис. 1), анализ режимов их работы и схемных решений.

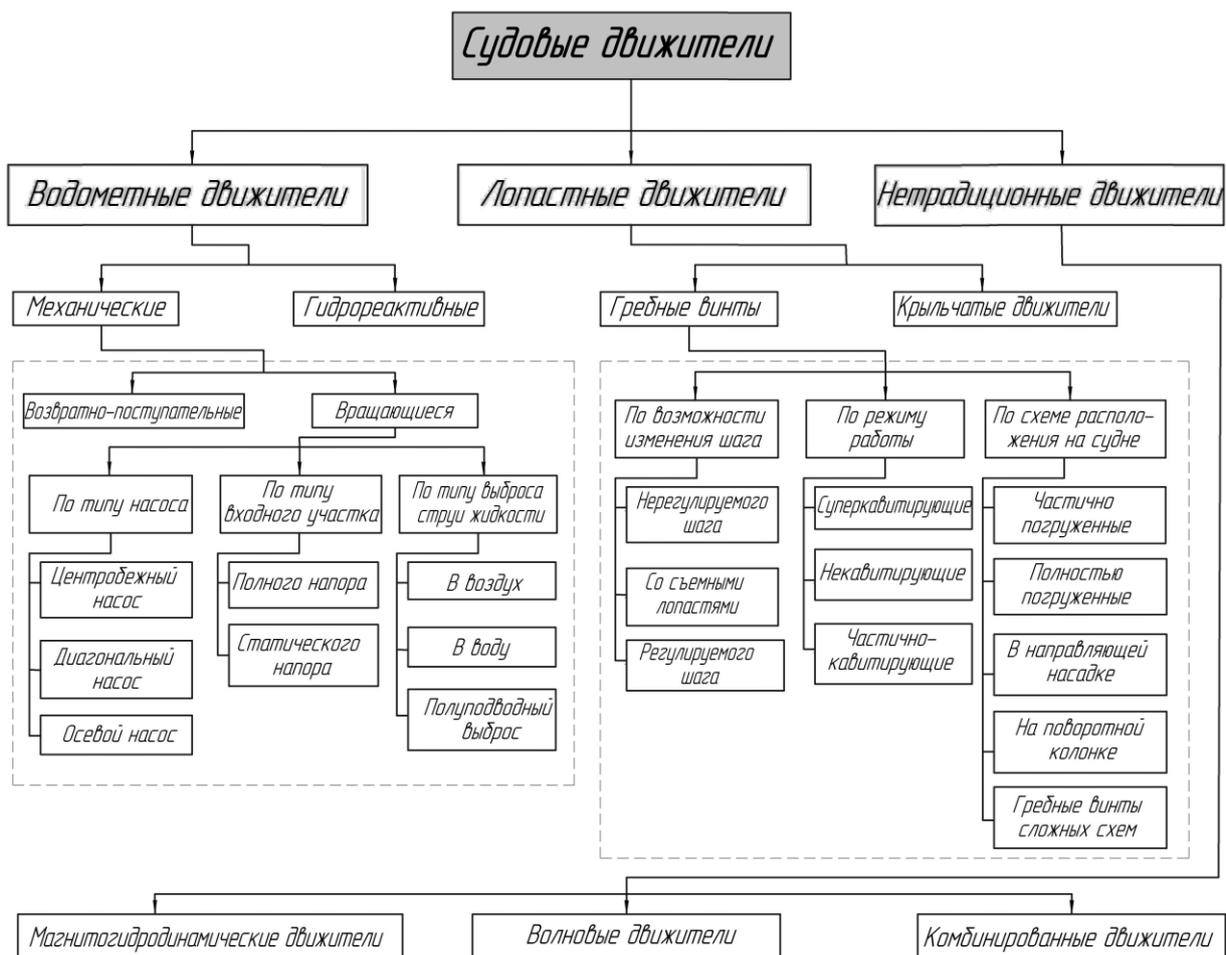


Рисунок 1. Схема классификации двигателей современных судов

Анализ зависимостей КПД различных двигателей от скорости движения судна (рис. 2) позволил выявить преимущества использования ВД по сравнению с традиционными ГВ, на скоростях движения судна от 60...70 км/ч.

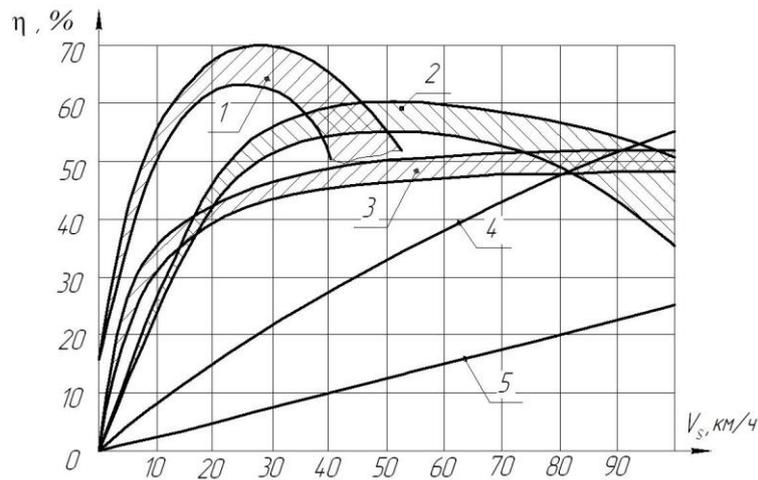


Рисунок 2. Теоретические зависимости КПД различных движителей от скорости движения судна:

1 – гребной винт; 2 – суперкавитирующий гребной винт; 3 – водомерный движитель;
4 – воздушный винт; 5 – воздушно-реактивный двигатель

Проведенный анализ компоновочных схемных решений системы «ВД – судно» и анализ схем ВД позволил выявить наиболее эффективные параметры системообразующих элементов компоновочной схемы типового ВД с одноступенчатым осевым лопастным насосом (рис. 3).

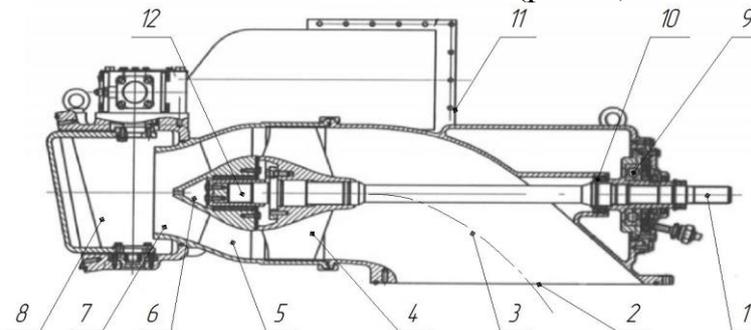


Рисунок 3. Компоновочная схема типового водомерного движителя с осевым насосом:

1 – приводной вал; 2 – водозаборник; 3 – водовод; 4 – рабочее колесо;
5 – спрямляющий аппарат; 6 – центральное тело; 7 – сопло; 8 – рулевое устройство;
9 – радиальный подшипник; 10 – торцевое дейдвудное уплотнение; 11 – корпус судна;
12 – радиально-упорный подшипник

Проведенный анализ методов исследования рабочего процесса ВД, выполненных отечественными и зарубежными авторами, показывает, что в настоящее время используются одномерные и двухмерные модели, методы 3D-моделирования рабочего процесса ВД, безразмерного анализа и оптимизации параметров ВД, физические эксперименты. Однако, рассмотренные подходы, применительно к ВД, утратили свое превосходство, с учетом возможности использования современных вычислительных средств, и требуют совершенствования.

Результатом проведенного анализа явились формирование направления научных исследований, формулировка цели, задач и методов их решения.

Во второй главе сформирована математическая модель рабочего процесса ВД, представляющая собой систему дифференциальных и алгебраических уравнений, которые решаются численными методами конечных элементов,

реализованными в ANSYS CFX, и проведено моделирование нескольких вариантов геометрии ВД на различных режимах работы.

При моделировании рабочего процесса ВД решается система уравнений гидродинамики, включающая осредненные по числу Рейнольдса уравнения Навье-Стокса, неразрывности, энергии, модели турбулентности, кавитационного массопереноса с использованием метода взвешенных невязок.

Уравнение неразрывности для однофазной несжимаемой жидкости:

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

где V_x, V_y, V_z – компоненты вектора скорости; x, y и z – глобальные декартовы координаты.

Уравнение импульсов (Навье-Стокса):

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho \nabla (\vec{V} \times \vec{V}) = -\nabla p + \nabla \tau + \rho g_i; \quad (2)$$

где p – давление; ρ – плотность; t – время.

$$\tau = \mu \left(\nabla \vec{V} + (\nabla \vec{V})^T - \frac{2}{3} \delta \cdot \nabla \vec{V} \right), \quad (3)$$

где μ – молекулярная вязкость; δ – символ Кронекера.

Уравнение энергии в форме энтальпии:

$$\rho \frac{d}{dt} \left(C_p \cdot T + \frac{V^2}{2} \right) - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \left[\rho \vec{V} \cdot \left(C_p T + \frac{V^2}{2} \right) \right] = \nabla (\vec{V} \cdot \tau), \quad (4)$$

где T – температура жидкости; C_p – удельная теплоемкость.

Система уравнений рабочего процесса ВД замыкается моделями турбулентности, кавитации, состояния жидкости, начальными и граничными условиями. Моделирование турбулентности проводится с помощью моделей k - ε , Shear Stress Transport (SST) (модификация k - ω), LRR Reynolds Stress и RNG k - ε . Моделирование кавитационного массопереноса проводится с помощью уравнения Рэлея-Плессета. Уравнение неразрывности для газовой фазы:

$$\frac{\partial(\rho_v \cdot \alpha_v)}{\partial t} + \nabla(\rho_v \cdot \vec{V}_v \cdot \alpha_v) = \nabla(\Gamma \cdot \nabla \alpha_v) + R_e - R_c, \quad (5)$$

где α_v – объемная доля компонента; V – индекс паровой фазы; R_e, R_c – скорости испарения и конденсации, соответственно; e, c – индексы испарения и конденсации, соответственно; Γ – функция диффузии.

Уравнение скорости образования паровой фазы:

$$\dot{m}_{fv} = C_e \frac{3r_{nuc}(1-\alpha_v)\rho_v}{R_{nuc}} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_v - p}{\rho_f}} \text{sign}(p_v - p). \quad (6)$$

где C_e – коэффициент испарения; r_{nuc} – начальная объемная доля пара; R_{nuc} – средний диаметр пузырьков; f – индекс жидкой фазы.

Осреднение полученных в результате численного моделирования параметров потока производится следующим образом (например, давление):

$$p_{cp} = \frac{\iint p(x, y) \cdot \rho \cdot V_n(x, y) \cdot dx dy}{\dot{m}}, \quad (7)$$

где p_{cp} – осредненное давление; \dot{m} – массовый расход жидкости.

Перечень основных расчетных и исходных параметров ВД определяется схемными решениями системы «ВД – судно» и условиями эксплуатации.

Объектом исследования является ВД глиссирующего катера с входным устройством статического напора, лопастным насосом оседагонального типа и реактивным соплом наружного поджатия с выбросом струи в воздух (рис. 4).

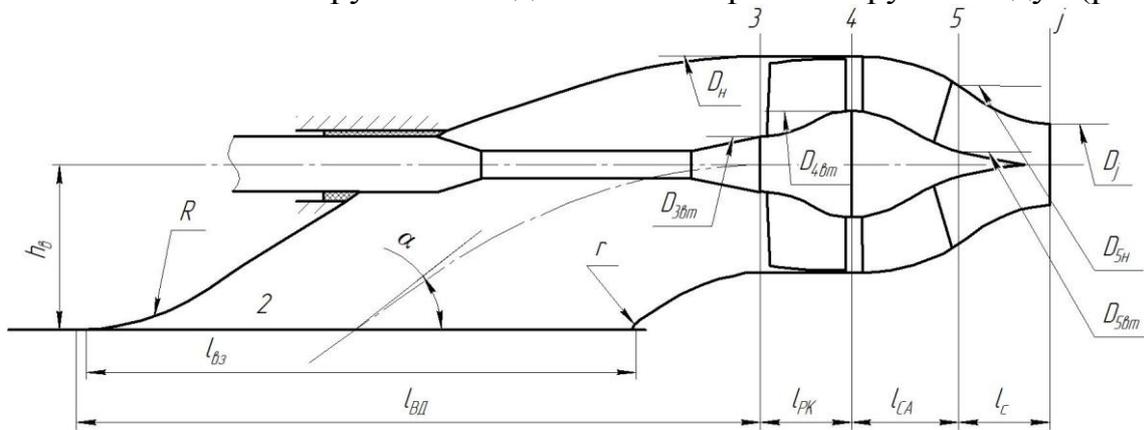


Рисунок 4. Расчетная схема лопастного насоса и водометного движителя:

$l_{вз}$ – длина водозаборника; $l_{вд}$ – длина водовода; h_b – высота подъема средней линии; $l_{РК}$ – осевая длина РК; $l_{са}$ – осевая длина спрямляющего аппарата (СА); l_c – осевая длина реактивного сопла; $D_{3вт}$ – диаметр втулки на входе в РК; $D_{4вт}$ – диаметр втулки на выходе из РК; $D_{5вт}$ – диаметр втулки на выходе из СА; $D_{5шт}$ – диаметр наружной стенки на выходе из СА; D_n – наружный диаметр РК; α – угол средней линии на входе в водовод;

R, r – радиусы кривизны кромок водозаборника

Условие движения катера с данным типом ВД на режиме глиссирования имеет вид:

$$\begin{cases} P = \rho Q (\sqrt{2gH_{РК}} - \varepsilon V_k); \\ P = R_k; \end{cases} \quad (8)$$

где P – тяга ВД; V_k – скорость движения катера; R_k – сопротивление движению судна; Q – объемная подача насоса; ε – коэффициент попутного потока ($0 < \varepsilon < 1$).

Напор, создаваемый рабочим колесом, и скоростной напор струи (β), засасываемой ВД, расходуются на скоростной напор струи, выходящей из сопла (j) и потери энергии в проточной части ВД $h_{вд}$:

$$H_{РК} = \frac{V_j^2}{2g} + h_{вд} - \beta \frac{V_k^2}{2g}. \quad (9)$$

Потребляемая мощность определяется по следующему соотношению:

$$N_{\Pi} = \frac{\rho g Q H_{РК}}{\eta_{РК}} = M_{РК} \cdot \omega, \quad (10)$$

где $\eta_{РК}$ – КПД РК; $M_{РК}$ – момент сил на РК; ω – угловая частота вращения РК.

На швартовом режиме уравнение движения катера имеет вид:

$$\begin{cases} P = \rho Q \sqrt{2gH_{РК}}; \\ \dot{V}_k = \frac{P - R_k}{M_k}; \end{cases} \quad (11)$$

где M_k – масса катера.

Профиль лопастей РК определяется зависимостью шага лопасти S_i от угла относительной скорости β_i и текущим радиусом r_i :

$$S_i = 2 \cdot \pi \cdot r_i \cdot \operatorname{tg} \beta_i. \quad (12)$$

Значение диаметра втулки РК изменяется по кубическому закону, что обеспечивает передачу энергии рабочей жидкости с минимальными потерями:

$$d_{\text{вти}} = D_{\text{звт}} + (D_{\text{4вт}} - D_{\text{3вт}}) \cdot (a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + a_3 \cdot x^3), \quad (13)$$

где a_1, a_2, a_3 – теоретические коэффициенты, определяющие форму параболы.

Теоретическая работа $L_{\text{т}}$, совершаемая РК, для каждой линии тока k определяется по формуле:

$$L_{\text{tki}} = (w_{k1} \cos \beta_{k1} - w_{ki} \cos \beta_{ki}) \cdot \omega \cdot r_{ki}, \quad (14)$$

где w – относительная скорость движения жидкости в РК.

В результате численного моделирования получены поля гидродинамических параметров потока в проточной части ВД (рис. 5, б) и интегральные характеристики рабочего процесса ВД (рис. 7, 8).

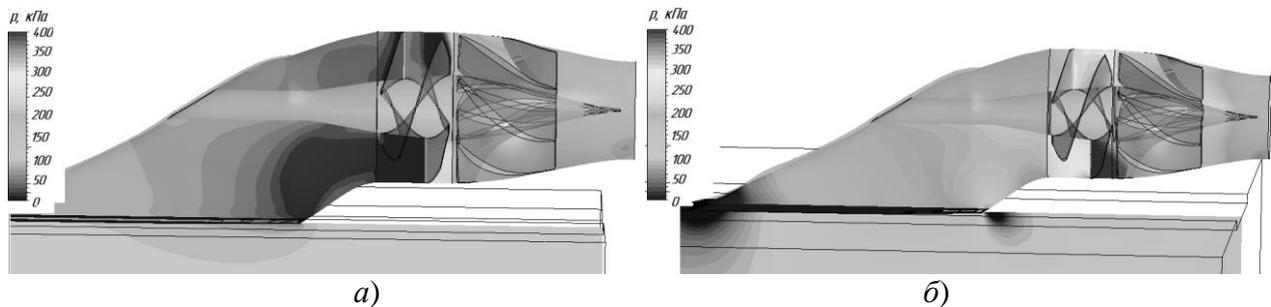


Рисунок 5. Распределение статического давления в продольной плоскости водометного движителя ($n = 5500$ об/мин):

a – швартовый режим; b – скоростной режим ($V_{\text{к}} = 20$ м/с)

Анализ результатов численного моделирования рабочего процесса ВД показывает, что на нижней стенке водовода образуется область с низким статическим давлением (< 10 кПа, рис. 5, a), что является причиной кавитации при режимах ускорения судна. На скоростных режимах (рис. 5, b) области низкого давления локализованы на входных кромках водовода и не влияют на параметры потока в лопастном насосе.

Результатом влияния неравномерности потока перед РК и низких областей давления в водоводе является кавитация. Условия возникновения кавитации характерны для швартового режима, когда давление в водоводе изменяется в диапазоне $0,1 \dots 1$ атм (рис. 6, a).

Возникновение кавитации допускается на засасывающей стороне лопастей РК на швартовых режимах работы ВД, например на рис. 6 приведено распределение статического давления на засасывающей стороне лопастей и объем каверны, где доля пара $\alpha_v > 0,9$. По результатам моделирования установлено, что около 80% длины хорды лопастей занимают листовые кавитационные каверны (рис. 6, a), однако их возникновение допускается в работе ВД. Установлено, что листовая кавитация на лопастях РК снижает тягу ВД в среднем на 30%.

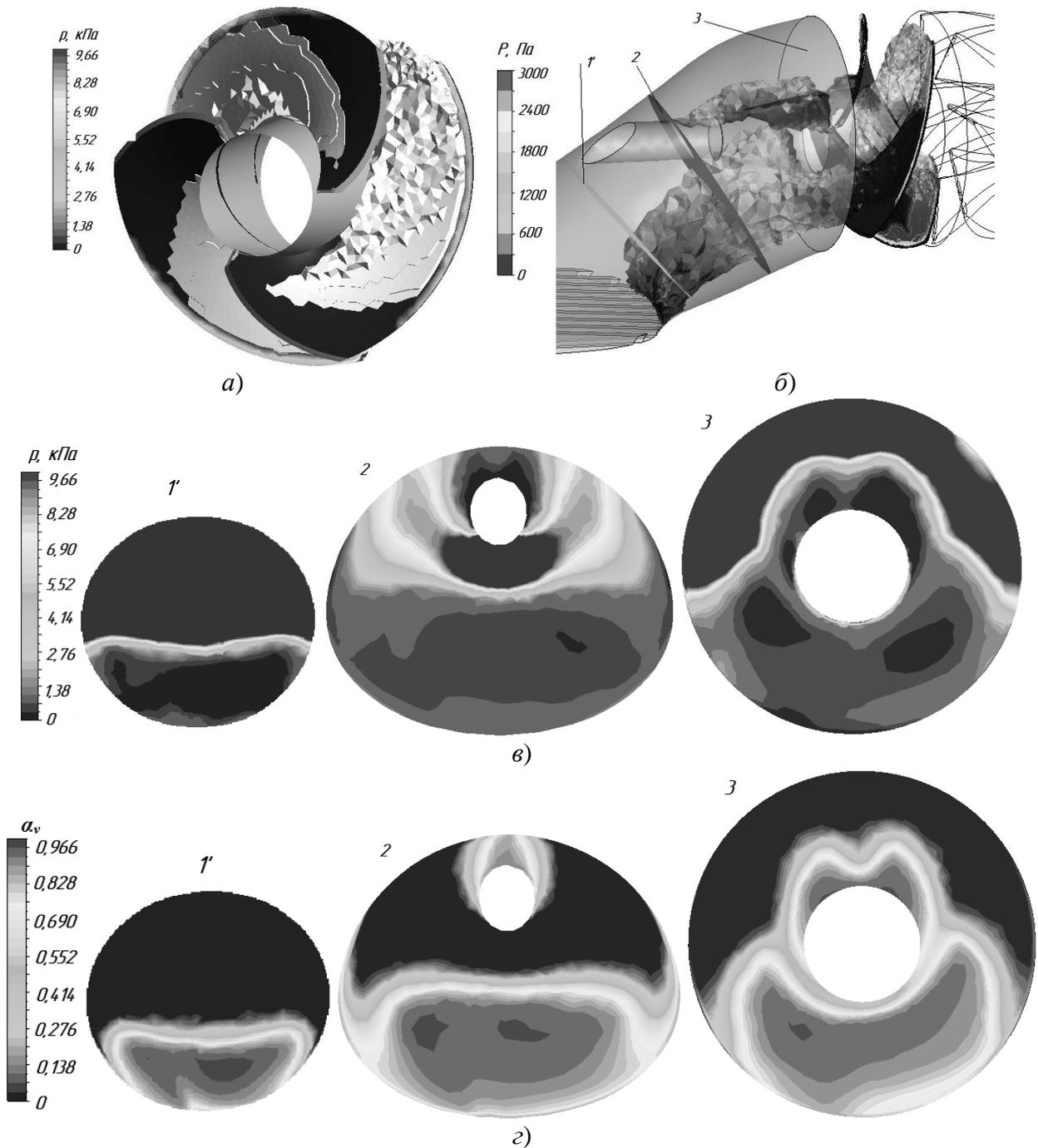


Рисунок 6. Образование кавитации при работе ВД ($n = 5500$ об/мин, $T = 278$ К):
a – листовая кавитация на лопастях РК; *б* – кавитация в водоводе и на лопастях РК;
в, г – распределение статического давления и пара, соответственно, в сечениях 1', 2 и 3

Результаты моделирования показывают, что образование кавитации возможно также в узких сечениях водовода при повышенных местных скоростях потока (рис. 6, б), при этом кавитация существенно снижает тягу ВД (в среднем на 60%) и, как следствие преимущество, поэтому от нее необходимо избавляться. Подробное распределение пузырьков пара можно исследовать по сечениям, приведенным на рис. 6 в, г. Для устранения кавитации в водоводе рекомендуется увеличивать площадь водозаборника за счет регулируемого входного устройства и применять РК меньшего шага.

Интегральные характеристики ВД (рис. 7, 8) позволяют выработать рекомендации к совершенствованию рабочего процесса ВД и определить оптимальные геометрические параметры проточной части и режимы работы ВД.

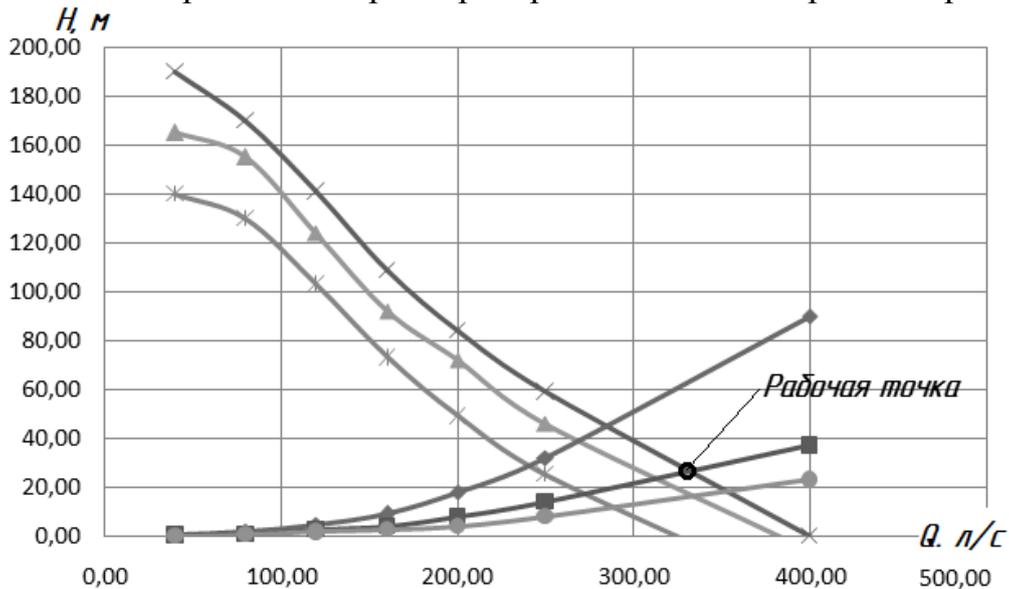


Рисунок 7. Характеристика лопастного насоса с РК переменного шага:

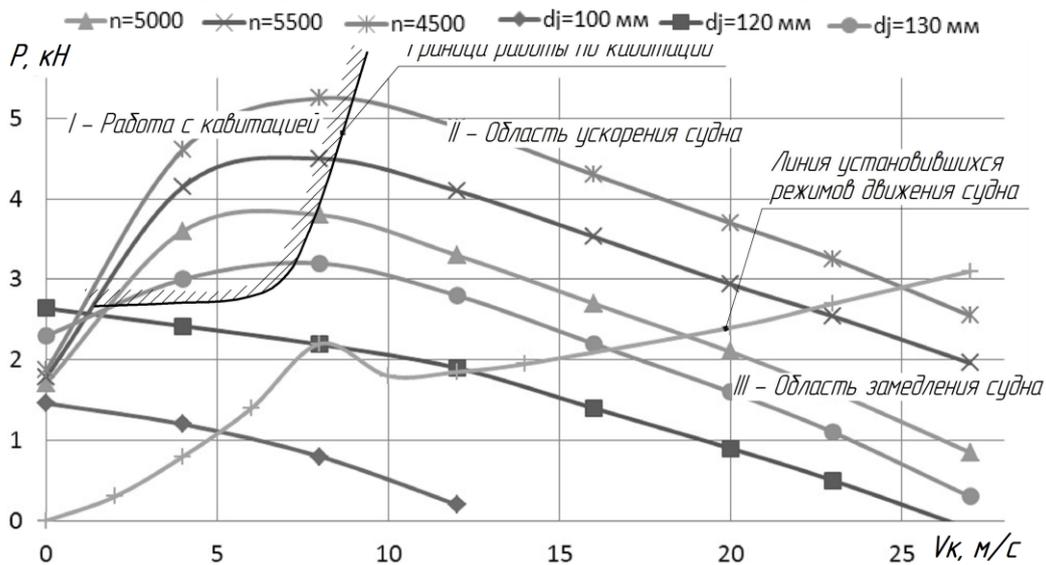


Рисунок 8. Тяговые характеристики водометного движителя:

— $n=3000$ — $n=4000$ — $n=5000$ — $n=4500$ — R — $n=5500$ — $n=6000$

На основе результатов моделирования было получено, что использование оседиагональных РК позволяет достичь максимальное значение КПД 89%, по сравнению с осевыми, спрофилированными по шнековому закону, у которых КПД составляет 84%. С целью повышения скорости судна, целесообразно уменьшать объемную подачу насоса, при этом увеличивать напор – в таком случае рекомендуется использовать РК меньшего диаметра. Моделирование рабочего процесса ВД с оседиагональным РК переменного шага показывает, что при той же потребляемой мощности можно увеличить скорость судна до $V_k = 22,5$ м/с, по сравнению с $V_k = 20$ м/с для ВД с РК осевого типа.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований рабочего процесса ВД и верификации математической модели.

Для получения достоверной информации о рабочем процессе необходимо выявить места размещения приемников давления в проточной части ВД, основываясь на результатах численного моделирования. Численное моделирование рабочего процесса ВД показывает существенную неравномерность потока в проточной части: до 30 % на входе в РК; до 25 % на выходе из РК и СА; до 20 % на выходе из сопла (рис. 9).

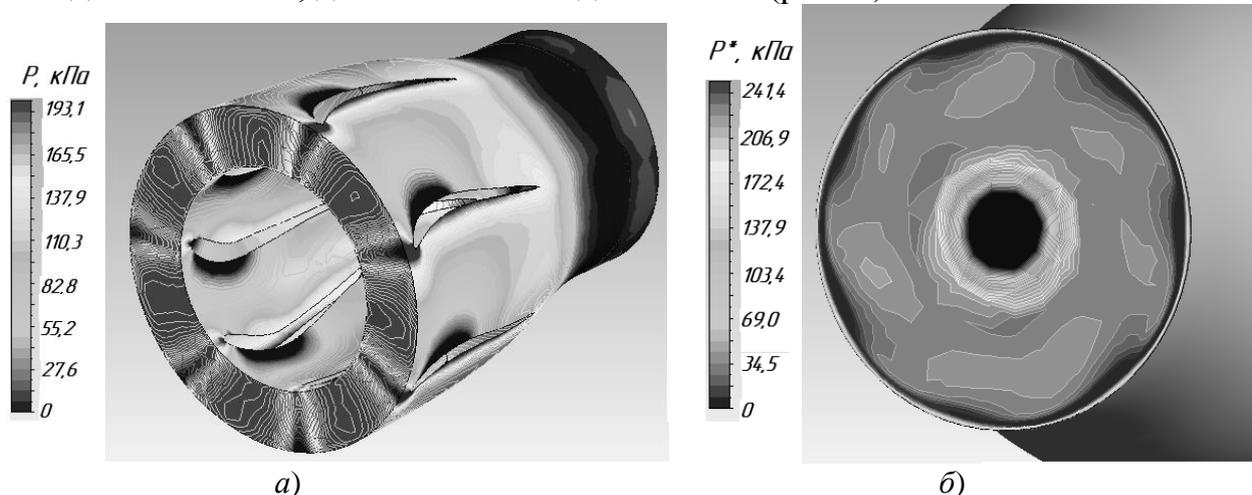


Рисунок 9. Поля давлений перед СА (а) и на выходе из сопла (б)

Одним из вариантов препарирования проточной части ВД является размещение приемников полного давления на выходе из сопла в вертикальной и горизонтальной плоскостях, а также приемников статического давления в наружной стенке ВД в характерных сечениях 'з', '4' и 'j' (рис. 10).

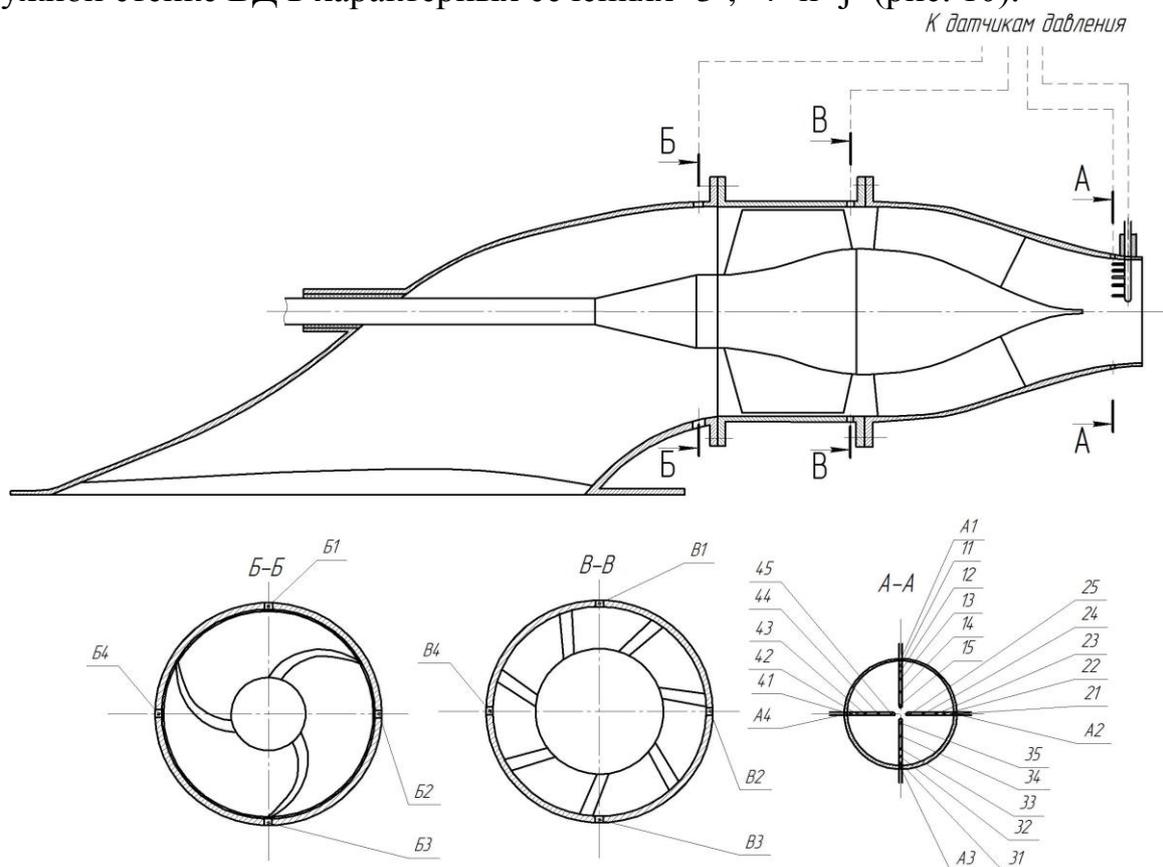


Рисунок 10. Схема экспериментального стенда ВД

Сравнение локальных параметров скорости в соответственных точках эпюры показывает, что максимальное расхождение между физическим экспериментом (CMS) и моделированием составляет 44 % при $r/R = 0,8$.

Анализ интегральных параметров ВД показывает, что при моделировании получаются несколько завышенные параметры, чем получены в эксперименте. Максимальное расхождение (16,7 %) наблюдается для момента сил на РК M_{PK} . Расхождение интегральных параметров объясняется неточным моделированием поля скоростей и, соответственно давлений, в проточной части данного ВД. Для повышения точности расчетов необходимо провести корректировку модели турбулентности $k-\epsilon$ и рассмотреть варианты расчетов с другими моделями, учитывающими анизотропию напряжений в пограничном слое.

В четвертой главе проведена верификация математической модели рабочего процесса ВД, обобщены данные численного моделирования, предложен метод проектирования проточной части ВД, а также разработана методика моделирования (рис. 11).

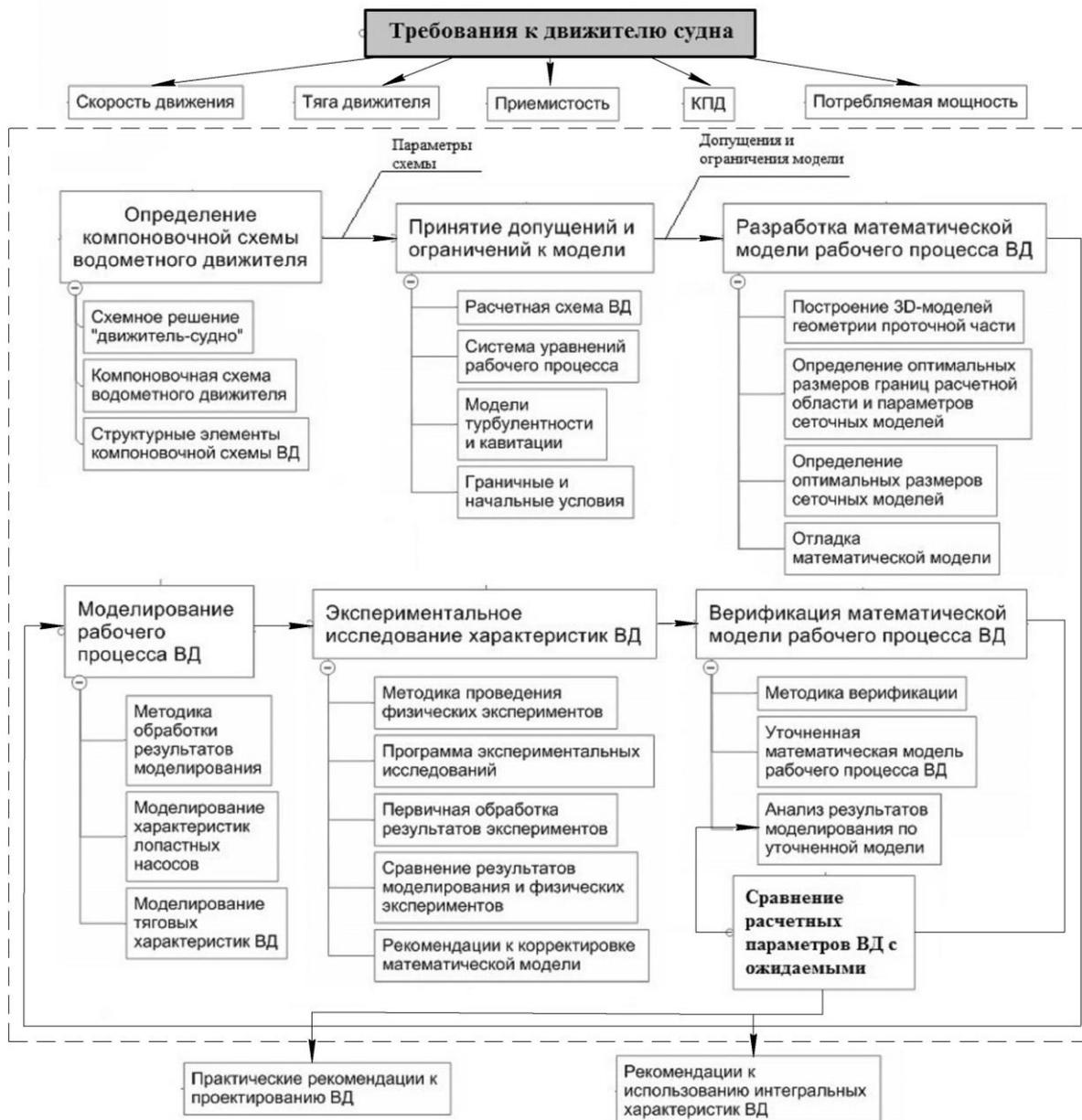


Рисунок 11. Структурная схема методики моделирования рабочего процесса ВД

В качестве входных параметров методики используются требования к ВД в составе скоростного судна, такие как скорость движения судна, тяга ВД, потребляемая мощность, приемистость, КПД ВД. Выходными данными являются расчетные параметры рабочего процесса ВД, практические рекомендации к проектированию ВД и моделированию рабочего процесса.

Данная методика направлена на формирование геометрии проточной части ВД, которая необходима при проведении численного моделирования и позволяет на начальном этапе сформировать проточную часть с характеристиками ВД, отличающимися от характеристик, заложенных при проектировании не более чем на 3 %.

Исследование моделей турбулентности показывает, что для безотрывных течений целесообразно использовать модель турбулентности $k-\epsilon$, а для закрученных течений такие модели как SST, LRR Reynolds Stress (RS). В частности, течение в сопле имеет простую структуру с формированием пограничного слоя, а в рабочем колесе и водоводе течение имеет отрывы от стенок, циркуляционные зоны и повороты потока.

Сравнение эпюр скоростей на выходе из сопла ВД модельного катера лаборатории CMS (рис. 12) показывает, что наиболее близкие результаты к физическому эксперименту позволяет получить модель турбулентности SST, модель LRR RS требует на 50 % больше времени расчета, чем SST, при этом результаты моделирования незначительно отличаются от SST, а модель турбулентности $k-\epsilon$ не позволяет получить близких к физическому эксперименту результатов. Моделирование эпюры осевой скорости из сопла ВД катера FreeRider-490C-Jet (рис. 13) с использованием модели SST позволило снизить расхождение с физическим экспериментом до 3 %.

Неизвестные коэффициенты в модели кавитации Рэлея-Плессета были откорректированы в диапазоне температур окружающей жидкости 5...40 °С, что позволило в численном моделировании получать реальные размеры кавитационных каверн, влияющие на тягу ВД. После корректировки модели кавитации погрешность по расчету швартовой тяги снизилась до 2,5 %.

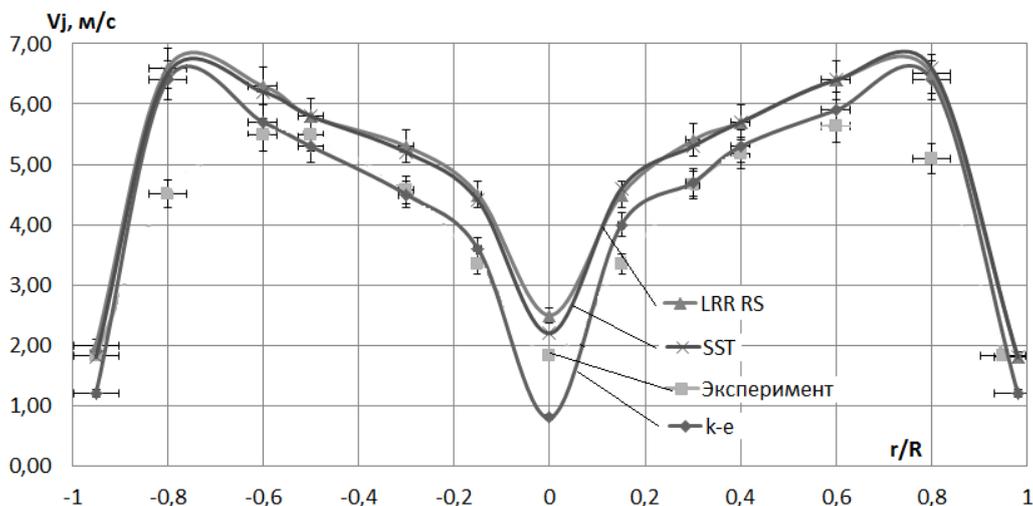


Рисунок 12. Эпюра скорости на выходе из сопла:

$$V_k = 2.24 \text{ м/с}, n = 5250 \text{ об/мин (модельный катер лаборатории CMS)}$$

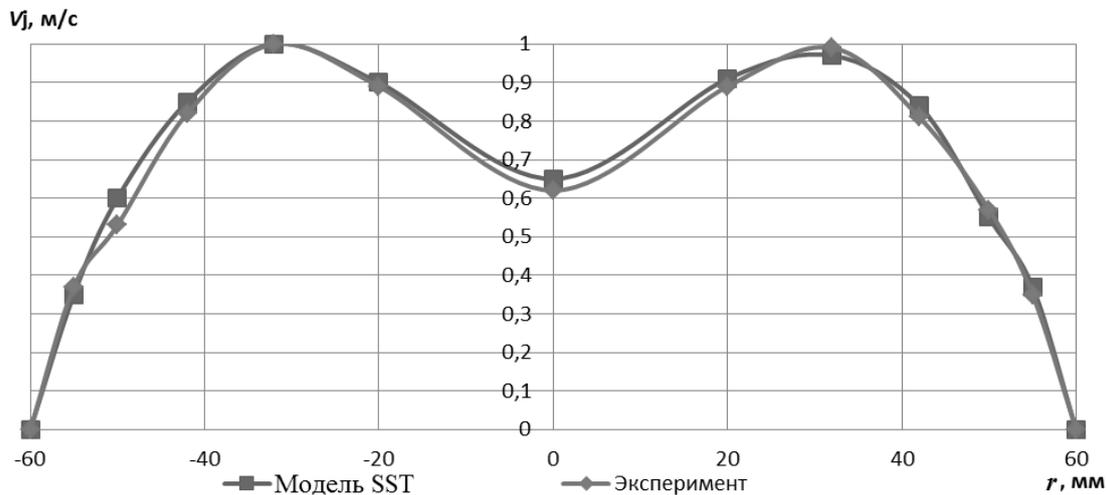


Рисунок 13. Эпюра скорости на выходе из сопла: $V_k = 23$ м/с, $n = 5500$ об/мин (катер FreeRider-490C-Jet)

Моделирование нестационарных течений в проточной части ВД, показывает, что амплитуда колебаний момента сил M_{PK} и упора P_{PK} на швартовых режимах достигает 25 %, а на скоростных режимах находится в пределах 5 %. Причинами возникновения нестационарных течения в проточной части ВД являются: отрыв потока от стенок водовода; неравномерное поле скоростей на входе в РК; взаимодействие лопаточных венцов ротора и статора; кавитационные каверны, объем и расположение которых постоянно меняется.

Разработанную методику 3D-моделирования рекомендуется использовать при исследовании рабочего процесса компоновочных схем «ВД – судно» с входными устройствами статического напора, лопастными насосами осевого или оседиагонального типов, реактивными соплами наружного поджатия с выбросом струи в воздух и других объектов, схожих по рабочему процессу. Методика позволяет рассчитывать швартовые и скоростные режимы работы ВД в диапазоне температур 5...40 °С, при этом погрешность моделирования локальных и интегральных характеристик составляет не более 3 %.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Выполнен аналитический обзор движителей современных судов и обоснована целесообразность использования ВД в качестве движителя современных маломерных судов. Проведенный анализ конструктивно-компоновочных схем системы «ВД – судно» показывает, что для глиссирующих катеров наиболее энергоэффективным является ВД с входным устройством статического напора, лопастным насосом оседиагонального типа и реактивным соплом с выбросом струи в воду.

2. Сформирована математическая модель рабочего процесса ВД с учетом реальной геометрии проточной части, неравномерности потока перед рабочим колесом и влиянием паровой кавитации на характеристики ВД. Установлено, что при моделировании рабочего процесса целесообразно использовать модели турбулентности SST и LRR RS. При моделировании паровой кавитации с использованием модели Рэля-Плессета необходимо вводить коэффициенты

конденсации C_c и парообразования C_e , в зависимости от температуры жидкости, а также использовать начальные условия, полученные при моделировании течения без кавитации.

При исследовании влияния геометрии проточной части на рабочий процесс ВД выявлено, что наличие радиального зазора в пределах $r/R < 1$ % влияет на параметры лопастного насоса до 5 %, поэтому его необходимо учитывать при моделировании, а радиусы галтелей лопаток на втулке РК и СА несущественно влияют на параметры ВД и их можно не учитывать.

Исследование ВД с различными РК – шнекоосевым с шагом $S = 180$ мм, шнекоосевым с шагом $S = 140 \dots 220$ мм и оседиагональным с переменным шагом показывает, что при располагаемой мощности энергетической установки $N = 103$ кВт можно увеличить скорость катера FreeRider-490C-Jet с 20 до 23 м/с. При этом максимальный КПД оседиагонального РК составляет 89 %, а максимальные КПД обоих шнекоосевых колес практически совпадают и составляют 83 %.

3. По результатам верификации на основе физического эксперимента, заимствованного из отчета лаборатории CMS, обоснованы соответствующие модели турбулентности для различных режимов работы ВД, выработана методика построения сетки, отрегулированы итерационные шаги по времени.

На основе физических экспериментов, проведенных на опытной ходовой лаборатории в составе глиссирующего катера FreeRider-490C-Jet, получены характеристики ВД с шнекоосевыми РК ($S = 180$ мм и $S = 140 \dots 220$ мм) и установлено, что усложнение геометрии РК в данном случае не приносит повышения эффективности рабочего процесса. При использовании оседиагонального РК переменного шага с меньшим диаметром ($D_n = 180$ мм) при той же потребляемой мощности $N = 103$ кВт скорость катера увеличилась с 20 до 23 м/с.

4. Проведена верификация модели кавитации Рэлея-Плессета, в которой скорректированы эмпирические коэффициенты $C_c = 0,01$ и $C_e = 50$ в диапазоне температур окружающей жидкости $5 \dots 40$ °С, что позволяет в численном моделировании получать распределения зон кавитации, соответствующие реально протекающим процессам. Сравнение интегральных характеристик РК и ВД, полученных при моделировании и физическом эксперименте, показывает, что максимальная погрешность составляет не более 2,5 %.

Моделирование нестационарных характеристик рабочего процесса ВД (момент сил и упор на РК) показывает, что на швартовых режимах амплитуда колебаний интегральных параметров достигает до 25 %, а на скоростных режимах – лежит в пределах 5 %. Полученные нестационарные характеристики позволяют оценить уровень шума и вибраций в элементах конструкции ВД.

Разработанную методику моделирования рекомендуется применять при исследовании рабочего процесса ВД с входными устройствами статического напора, лопастными насосами шнекового, осевого или оседиагонального типов и реактивными соплами наружного поджатия с выбросом струи в воздух и других смежных объектах. Методика позволяет прогнозировать интегральные и локальные параметры рабочего процесса ВД с погрешностью не более 3 % в диапазоне температур рабочей жидкости $5 \dots 40$ °С.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

В центральных рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ

1. Абдулин А. Я., Суханов А. В., Сенюшкин Н. С., Ямалиев Р. Р. Системы автоматизированного проектирования как инструмент решения наукоемких конструкторских задач судостроения // Вестник ВГТУ. Воронеж, 2010. Т. 6, №10. С. 114 – 117.
2. Абдулин А. Я., Проскурина Н. Б., Сенюшкин Н. С., Ямалиев Р. Р. Оценка возможности использования программного комплекса ANSYS CFX при расчете центробежных компрессоров // Вестник ВГТУ. Воронеж, 2011. Т. 7, №3. С. 215 – 219.
3. Абдулин А. Я., Месропян А. В. Особенности численного моделирования рабочего процесса водометных движителей // Вестник УГАТУ. Уфа, 2013. Т. 17, №3 (55). С. 130 – 137.
4. Абдулин А. Я., Месропян А. В. Расчет характеристик водометных движителей глиссирующих катеров // Вестник ЮУрГУ. Челябинск, 2014. Т. 14, №1. С. 41 – 51.

В других изданиях (статьи)

5. Абдулин А. Я., Порошкин К. В., Сенюшкин Н. С. Верификация программного комплекса ANSYS CFX на задачах обтекания жидкостью удобообтекаемых тел // Молодой ученый. Чита, 2011. Т. 1, №7 (30). С. 49 – 53.
6. Абдулин А. Я. Современный водометный движитель для высокоскоростного катера // НТК «Мавлютовские чтения», УГАТУ. Уфа, 2012. Т.1. С. 61–62.
7. Абдулин А. Я. К вопросу о выборе эффективного движителя высокоскоростного катера // Машиностроение, электроника, приборостроение / Сб. научных трудов VIII Всероссийской зимней школы-семинара асп. и мол. уч. Актуальные проблемы науки и техники. Уфа, 2013. Т. 2. С. 4 – 8.
8. Абдулин А. Я. Моделирование кавитирующего течения в водометном движителе // Молодежный вестник УГАТУ. Уфа, 2013. Т. 1, №3 (8). С. 74 – 84.
9. Абдулин А. Я. Методика моделирования характеристик водометных движителей с помощью численного моделирования // НТК «Мавлютовские чтения», УГАТУ. Уфа, 2013. Т. 1. С. 58–60.
10. Абдулин А. Я. Исследование рабочего процесса водометных движителей глиссирующих катеров с помощью численного моделирования в ANSYS CFX // Молодежный научно-технический вестник. [Электронный ресурс]. М.: МГТУ, 2013. № 11. – Режим доступа: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/637042.html>.
11. Абдулин А. Я. Методика расчета характеристик водометных движителей с помощью численного моделирования // Материалы всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых ученых, СПбГТУ, СПб. 2013. С. 4.

Диссертант



А. Я. Абдулин

АБДУЛИН Арсен Яшарович

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОЧЕГО
ПРОЦЕССА ВОДОМЕТНЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ
СКОРОСТНЫХ СУДОВ

Специальность:
05.04.13 – Гидравлические машины
и гидропневмоагрегаты

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 28.04.2014. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman.
Усл. печ. л. 1,0. Уч.-изд. л. 0,9.
Тираж 100 экз. Заказ № 285.

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный
технический университет»
Центр оперативной полиграфии
450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12