

На правах рукописи



**ШАБЕЛЬНИК Юлия Андреевна**

**ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ МАШИНЫ С ПЕТЛЕВИДНЫМИ ЛОПАСТЯМИ.  
ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА**

Специальность 2.5.10 – Гидравлические машины, вакуумная, компрессорная  
техника, гидро- и пневмосистемы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Уфа 2026

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» на кафедре «Гидрогазодинамика трубопроводных систем и гидромашины»

**Научный руководитель** доктор технических наук, профессор  
**Месропян Арсен Владимирович**

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор  
**Жарковский Александр Аркадьевич**  
профессор «Высшая школа энергетического машиностроения» ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»,

кандидат технических наук, доцент  
**Лямасов Александр Константинович**  
доцент кафедры «Гидравлические машины и гидропневмоагрегаты» ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

**Ведущая организация** ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)», г. Челябинск

Защита состоится 30 сентября 2026 г. в 13:00 часов на заседании объединенного диссертационного совета ВАК РФ 99.2.109.02 на базе ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет» (ОмГТУ), ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)» по адресу: 644050, г. Омск, пр. Мира, 11, ауд. П-202 Тел. (3812) 65-03-23, e-mail: iateterina@mail.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «СибАДИ» и на сайте университета по адресу: <https://sibadi.org/>; в библиотеке ФГАОУ ВО «ОмГТУ» и на сайте университета по адресу: <https://omgtu.ru/>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью учреждения, просим направлять в диссертационный совет по адресу: 644080, г. Омск, проспект Мира, 5, ауд. 1.108. Тел. (3812) 65-03-23,

Автореферат разослан 14 июля 2026 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат технических наук



И.А. Тетерина

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Гидравлические лопастные машины находят широкое применение в различных отраслях промышленности, они используются для перекачки жидкостей, в гидроэнергетике, в судостроении, в системах водоснабжения и водоотведения, в горнодобывающей и химической промышленности.

Лопастные гидравлические машины (ЛГМ) характеризуются высокой производительностью, надёжностью и долговечностью, однако имеют ряд недостатков, таких как высокий уровень шума и вибрации, сложность регулирования рабочего режима и высокие эксплуатационные затраты. Широкий спектр применения гидравлических лопастных машин, в условиях высоких требований к рабочему процессу, предопределяет востребованность разработки новых типов и схемных решений лопастных машин.

Лопастной винт является общеизвестным типом ЛГМ, широко используемым при перекачке жидкостей, в мешалках, в судостроении и других отраслях. Наиболее востребованной отраслью применения лопастного винта является судостроение. Предъявляемые в настоящее время требования к речному и морскому транспорту по обеспечению топливной экономичности, ужесточение экологических норм, определяют спектр новых задач для обеспечения эффективности современных ЛГМ в качестве судовых движителей: повышение КПД и топливной экономичности, улучшение кавитационных и акустических характеристик в сочетании с достижением больших скоростей судна. Вышеизложенное обуславливает необходимость повышения эффективности судовых движителей, что предполагает анализ тенденций развития гидравлических лопастных машин, разработку перспективных схемных решений, теоретическое обоснование эффективности схемных решений. Выполнение подобных работ позволит сформировать пути решения возникающих задач.

Наиболее широко распространенной конструктивной схемой ЛГМ в судостроении на сегодняшний день является гребной винт (ГВ) или лопастной винт (ЛВ). Развитие теории ЛВ было заложено Н. Е. Жуковским в начале XX

века, который обосновал вихревую теорию ЛВ, что послужило основой для разработки методов расчета, в развитии этой теории Э. Э. Папмелем были предложены диаграммы для расчета ГВ, значительный вклад в теорию лопастного винта и методики его расчета, в разное время, также внесли ученые С. А. Чаплыгин и Н. Н. Поляков, а также В. П. Ветчинкин, В. М. Лаврентьев, В. Л. Поздюнин, А. М. Басин, Ф. А. Брикс, ученые Крыловского государственного научного центра (А.А. Русецкий, Л.И. Вишневецкий, А.В. Пустошный и др.) и зарубежные специалисты Р.И. Тейлор, И.Д. Ван Мене, К. Танигучи, Ф. Гучи и др.

На практике, для определения взаимосвязи геометрических параметров винтов и их влияния на эффективность рабочего процесса, используют диаграммы для расчета винтов, разработанные по результатам испытаний серийных ЛВ. Полученные результаты для традиционных схем ЛВ имеют малую погрешность расчетов в сравнении с дальнейшими опытными испытаниями, однако ЛВ нестандартных схемных решений, спроектированные на основе сложного профилирования, не позволяют обеспечить должную степень точности результатов при расчетах на основе диаграмм. Аналогично, расчет возникающих на лопастях каверн, базирующийся на эмпирических зависимостях, использовании ряда закономерностей гидродинамики, действующих периодических давлений, критического числа кавитации, в результате приводит к существенным погрешностям определения кавитационных характеристик.

В настоящее время при проектировании перспективных лопастных машин широкое развитие получили численные методы моделирования, позволяющие с высокой точностью рассчитывать характеристики рабочего процесса лопастных винтов, результаты численного моделирования позволяют качественно и количественно определить протекание рабочих процессов и сопровождающих его явлений с учетом возникающих кавитационных каверн.

Использование современных CFD-методов позволяет на ранней стадии проектирования оценивать различные варианты конструктивных решений и выбирать оптимальный, при этом необходим комплексный подход к

обоснованному выбору схемного решения, с учетом вихревых следов за лопастями, нестационарности процессов в условиях неоднородного набегающего потока и кавитации.

Имеющийся научно-технический задел и уровень технологического совершенства не позволяют получить значительное повышение эффективности традиционных схемных решений лопастных машин. Дальнейшее повышение эффективности ЛВ обуславливает разработку новых схемных решений, характеристики рабочего процесса которых формируются на основе вычислительных экспериментов (численного моделирования) и верификации экспериментальными исследованиями.

Тенденции развития отрасли судостроения, представленные в обзорах научно-технических источников, свидетельствуют о перспективности лопастных винтов, имеющих петлевидную форму. Петлевидные лопастные винты (ПЛВ), в сравнении с традиционными ЛВ, обладают рядом преимуществ, такими как: повышение КПД, снижение уровня вибраций, шума, удельного расхода топлива. Особенности схемного решения позволяют развивать бóльшие скорости движения без возникновения кавитации.

Следует отметить, что выполнение численных исследований и оптимизация геометрических параметров петлевидных ЛВ осложняются отсутствием методик расчета подобных схемных решений. Таким образом, возрастающий уровень требований к энергоэффективности и гидродинамическому совершенству лопастных машин в сочетании с отсутствием перспективных схемных решений с соответствующим математическим и методическим обеспечением является актуальной проблемой. Обобщая вышеизложенное, можно сформулировать основное содержание работ, определяющих актуальность исследований и направленных на повышение эффективности ЛВ, пропульсивных качеств судна в целом. Ключевыми этапами разработки высокоэффективных ЛГМ являются: моделирование, исследования и оптимизация рабочих процессов петлевидных винтов, верификация и валидация результатов численных исследований, разработка методики проектирования петлевидных винтов.

**Цели и задачи исследования.** Целью диссертационной работы является повышение эффективности гидравлических машин с петлевидными лопастями.

**Основные задачи,** сформулированные для достижения поставленной цели исследования:

1) Аналитический обзор схемных решений лопастных гидравлических машин и судовых движителей, анализ работ по проблемам моделирования рабочих процессов лопастных гидравлических машин и судовых движителей.

2) Разработка математической модели и исследование рабочего процесса гидравлических машин с петлевидными лопастями с учетом влияния геометрических параметров.

3) Экспериментальные исследования и верификация математической модели петлевидных винтов.

4) Разработка методики проектирования петлевидных винтов.

**Научная новизна работы.** Новыми научными результатами, полученными в ходе работы, являются: разработанное схемное решение, математическая модель рабочего процесса петлевидного винта, результаты численного моделирования и экспериментальных исследований, а также методика проектирования, направленная на повышение эффективности гидравлических машин с петлевидными лопастями:

- предложена конструктивно-компоновочная схема петлевидного лопастного винта, отличающаяся от существующих тем, что форма лопастей имеет петлевидную форму (патент РФ №2780771, патент РФ №2849218);

- разработана математическая модель, отличающаяся тем, что впервые позволяет описывать рабочий процесс петлевидного лопастного винта, рассчитывать его характеристики с учетом кавитации, варьировать характерные геометрические параметры винта (изменение длины хорды вдоль петли, шаговое отношение, форма профиля) для оптимизации рабочего процесса;

- результаты экспериментальных исследований, отличающиеся тем, что для данного схемного решения впервые получены характеристики рабочего

процесса, на основе которых верифицирована математическая модель рабочего процесса петлевидных лопастных винтов;

- методика проектирования петлевидных лопастных винтов, позволяющая осуществлять выбор и расчет оптимального петлевидного лопастного винта.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Результаты исследований, разработанная математическая модель и методика моделирования рабочего процесса петлевидных лопастных винтов внедрены на предприятии АО УАП «Гидравлика», НТЦ «Геомеханика», НПА «Технопарк АТ» и в учебный процесс ФГБОУ ВО «УГНТУ».

Разработанная методика и результаты диссертационной работы имеют практическую ценность, а именно позволяют:

- рассчитывать основные характеристики петлевидных лопастных винтов, учитывать влияние кавитации, оптимизировать основные геометрические параметры петлевидных ЛВ с целью достижения высокой энергоэффективности;

- выполнять моделирование рабочего процесса петлевидных винтов с варьируемыми геометрическими параметрами и при различных режимах работы;

- проводить экспериментальные исследования и осуществлять верификацию математической модели рабочего процесса петлевидных ЛВ.

**Методы исследования.** Диссертационная работа выполнена с использованием методов численного моделирования, в основе которых лежит решение осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, теоретических основ рабочего процесса лопастных машин и методов экспериментальных исследований.

**Объекты исследования.** Новое схемное решение лопастной гидравлической машины, лопасти которой сформированы в пространстве для образования петли, а относительная ширина лопасти и относительное разнесение передней и задней части петлевидной лопасти переменны.

**Предметом исследования** является: рабочий процесс гидравлической машины с петлевидными лопастями в зависимости от геометрических параметров петлевидных лопастей.

**Положения, выносимые на защиту.**

1. Схемное решение лопастного винта с петлевидными лопастями, эффективность которого достигается за счет геометрии профиля, формы и расположения лопастей.
2. Математическая модель рабочего процесса петлевидного лопастного винта, позволяющая рассчитывать характеристики ЛВ с учетом кавитации и неравномерности потока, моделировать влияние геометрических параметров и внешних условий на параметры рабочего процесса. *(п.1 паспорта научной специальности)*
3. Результаты экспериментальных исследований рабочего процесса и верификация математической модели петлевидного лопастного винта. *(п.3 паспорта научной специальности)*
4. Методика проектирования петлевидного лопастного винта, позволяющая определять основные геометрические параметры. *(п.2 паспорта научной специальности)*

**Степень достоверности результатов работы и выводов,** содержащихся в диссертационной работе, подтверждается верификацией по данным физических экспериментов, полученных в ходе натурных испытаний, использованием признанных научных положений, апробированных методов и средств исследования, применением современных численных методов.

**Апробация результатов работы.** Основные теоретические положения и результаты работы докладывались и обсуждались на конференциях: XXIV Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика» (Москва: НИУ «МЭИ», 2020 г.); V Международная научно-техническая конференция «Мавлютовские чтения» (Уфа: УГАТУ, 2021 г.); Международная научно-техническая конференция «Перспективы развития двигателестроения» (Самарский университет, 2023 г)

**Публикации.** По результатам исследований и разработок по теме диссертационной работы в журналах и сборниках научных трудов опубликованы 12 работ, в том числе в 3 статьях, входящих в список научных изданий, рекомендованных ВАК; получено 3 патента РФ на изобретение.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав основного текста, заключения и списка литературы. Работа изложена на 178 листах машинописного текста, включающего 109 иллюстрации, 16 таблиц, библиографический список включает 107 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, которая посвящена разработке методики моделирования рабочего процесса петлевидных лопастных винтов (ПЛВ), сформулированы цель и задачи исследования, приведены основные положения и результаты, выносимые на защиту, показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, степень достоверности и апробация полученных результатов.

**В первой главе** проведен аналитический обзор научно-технической литературы по лопастным гидравлическим машинам и судовым движителям, в частности. Определены конструктивно-компоновочные схемные решения, разработана классификация лопастных машин и судовых движителей, отличающихся по техническим показателям, конструктивному исполнению, принципу действия, проанализированы особенности применения различных схемных решений.

Результаты сопоставительного анализа схемных решений и гидродинамических характеристик лопастных движителей показывает, что повышение КПД ГВ создает предпосылки для выхода на новые сегменты применения лопастных винтов на судах различного назначения, соответственно моделирование рабочих процессов и реализация новых схемных решений является актуальной задачей. Решение задачи повышения эффективности лопастной машины позволит расширить область применения полученных результатов в различном технологическом оборудовании, гидравлических перемешивающих устройствах.

Проведенный анализ научно-технической литературы, публикаций по теме диссертационной работы, патентный обзор, позволили сформировать основные направления исследований.

Во второй главе предложено схемное решение петлевидного лопастного винта. Идея эффективности петлевых винтов основывается на минимизации концевых вихрей, которые, как известно, создают большие потери, на рис.1 показан кавитационный след, создаваемый при работе ЛВ.



Рисунок 1. Вихревые течения при работе ЛВ

Расчет характеристик ПЛВ выполнен при принятых основных характерных параметрах лопастного винта: диаметр  $D = 240$  мм, относительный диаметр ступицы  $d_0/D = 0,266$ .

Общий вид петлевидного лопастного винта представлена на рис.2.

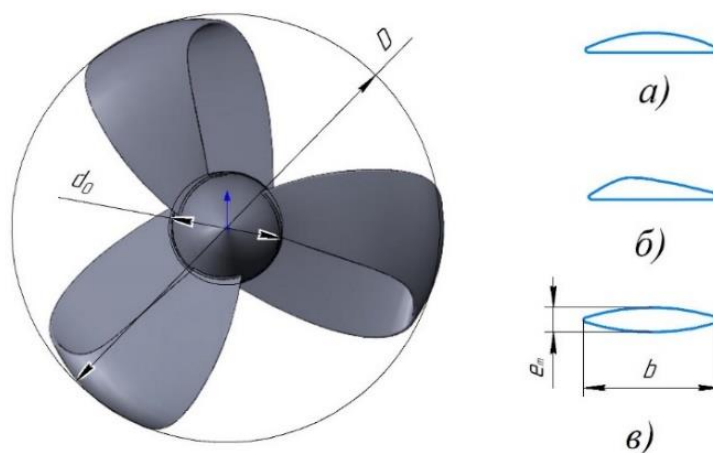


Рисунок 2. Петлевидный лопастной винт, с условным изображением профиля лопасти: а – сегментный; б – аэродинамический; в – двусторонний сегментный

Лопасть петлевидного винта представляет собой профиль, сформированный в пространстве для образования петли. Форма профиля оказывает значительное влияние на гидродинамические характеристики лопастного винта, в связи с этим рассмотрены три формы профиля:

- сегментный профиль, представляющий собой выпуклый геометрический контур, максимальная толщина которого располагается посередине хорды (рис. 2, а);

- аэродинамический профиль является геометрическим контуром, максимальная толщина которого смещена к входной кромке лопасти (рис. 2, б);

- двусторонний сегментный профиль является симметричным двояковыпуклым геометрическим контуром, максимальная толщина которого расположена в середине хорды профиля (рис. 2, в).

Рассмотрено влияние на гидродинамические характеристики петлевидного винта шагового отношения  $H/D$  в наиболее распространенном диапазоне значений  $1 \div 1,8$ , количества лопастей и относительной толщины лопасти  $e_m/b$ . Моделирование рабочего процесса проведено для 15 вариантов ПЛВ, варьируемые параметры представлены на рис. 3.

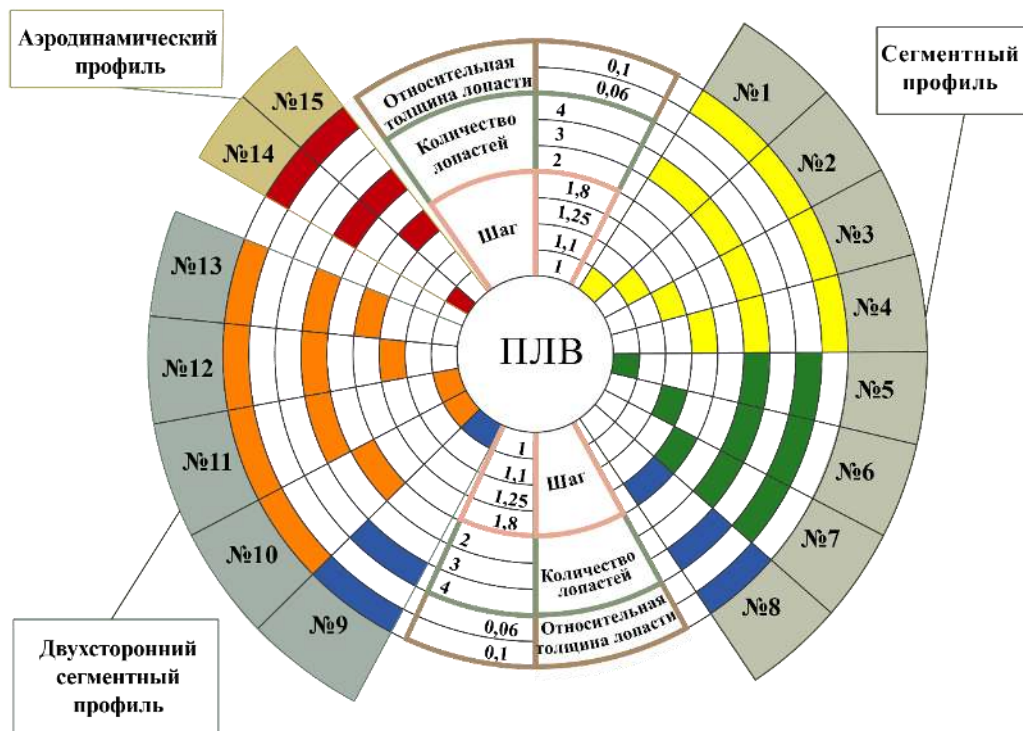


Рисунок 3 Параметры ПЛВ

Анализ и сравнение характеристик представленных вариантов ПЛВ проводится с использованием кривых действия гребного винта, в виде зависимостей коэффициента упора ( $K_T$ ) и коэффициента момента ( $K_Q$ ) как функции относительной поступи гребного винта ( $\lambda_p$ ), показывающие изменение эффективного упора и возникающего момента, в зависимости от скорости (относительной поступи). Коэффициенты упора  $K_T$  и момента  $K_Q$  вычисляются по зависимостям:

$$K_T = \frac{P}{\rho n^2 D^4}; K_Q = \frac{M}{\rho n^2 D^5}. \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность воды;  $P$  – упор гребного винта;  $M$  – крутящий момент гребного винта.

Расчет значений коэффициентов  $K_T$ ,  $K_Q$  позволяет определить КПД гребного винта – основной показатель его эффективности:

$$\eta_p = \frac{K_T \lambda_p}{K_Q 2\pi}. \quad (2)$$

Интегральные характеристики ПЛВ получены на основе разработанных моделей и серии расчетов, выполненных путем численного моделирования на основе конечно-элементного анализа, зависимости кривых действия петлевидного винта и КПД как функций относительной поступи вычислены путем варьирования скорости набегающего потока. Рабочий процесс петлевидного винта рассматривается в равномерном потоке, в квазистационарной постановке, при стандартных атмосферных условиях с использованием уравнений газовой динамики, описывающих механизмы переноса тепла, массы и количества движения.

Уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \cdot U) = 0 \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность,  $U$  – скорость потока,  $t$  – время.

Уравнение количества движения (или уравнение импульсов)

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \mu e_{ij}}{\partial x_j} + g_i \quad (4)$$

где  $e_{ij}$  – тензор скоростей деформации,  $g_i$  – массовые силы;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости.

Уравнение Навье-Стокса в общем виде:

$$\frac{dU}{dt} = \vec{J} - \frac{1}{\rho} \text{grad } p + \nu \nabla^2 \vec{U} + \frac{1}{3} \nu \text{grad } (\text{div} \vec{U}) \quad (5)$$

где  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости,  $\vec{J}$  – ускорение массовой силы.

Для моделирования кавитации используется модель Рэля-Плессета, основанная на дифференциальном уравнении, описывающем рост пузырьков в виде:

$$R_B \frac{d^2 R_B}{dt^2} + \frac{3}{2} \left( \frac{dR_B}{dt} \right)^2 + \frac{2\sigma}{\rho_f R_B} = \frac{p_v - p}{\rho_f}, \quad (6)$$

где  $R_B$  – радиус кавитационного пузырька;  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения жидкости на границе кавитационной каверны;  $\rho_f$  – плотность жидкости;  $p_v$  – давление насыщенного пара;  $p$  – давление окружающей жидкости.

Исследование влияния шагового отношения на гидродинамические характеристики проведено для каждого из рассматриваемых типов профиля ПЛВ. На рис. 4 приведены кривые действия и КПД петлевидного винта с сегментным профилем при различном шаговом отношении ( $H/D$ ). Винт №4 с большим шаговым отношением ( $H/D=1,8$ ) имеет высокие тяговые характеристики, но КПД при этом ниже варианта №3 с шагом  $H/D=1,25$ .

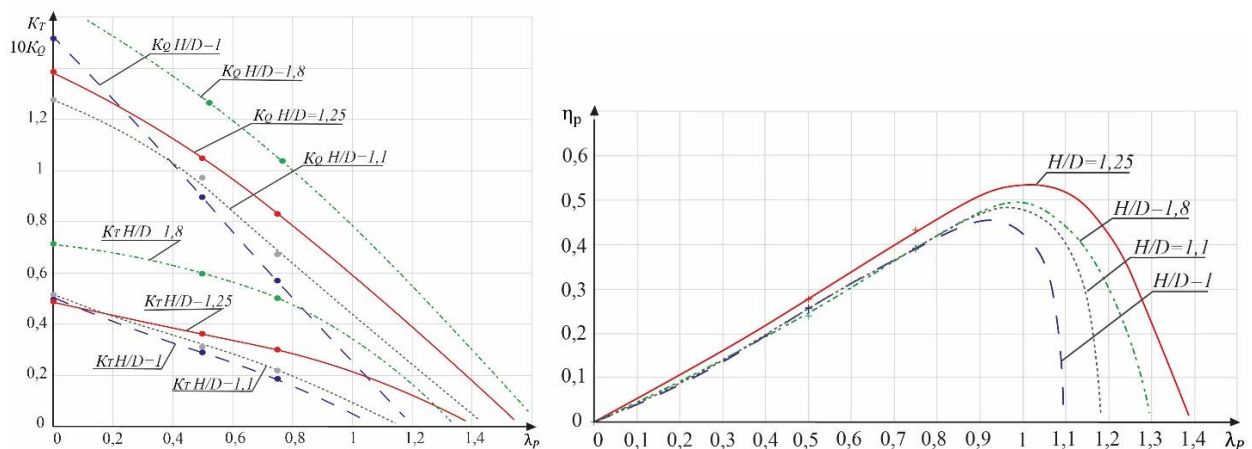


Рисунок 4. Кривые действия и КПД петлевидных винтов № 1–4:  
 — — — — ПЛВ №1  $H/D=1$ ; ..... — ПЛВ №2  $H/D=1,1$ ;  
 — — — — ПЛВ №3  $H/D=1,25$ ; - - - - - ПЛВ №4  $H/D=1,8$

Моделирование рабочего процесса ПЛВ выполняется в трех характерных точках, что позволяет выявить характер зависимостей и рассчитать максимально возможный КПД. Полученные кривые действия описываются по аппроксимирующим полиномиальным зависимостям вида:

$$K_T(\lambda_p) = C_1 \cdot \lambda_p^2 + C_2 \cdot \lambda_p + C_3 \quad (7)$$

$$K_Q(\lambda_p) = C_4 \cdot \lambda_p^2 + C_5 \cdot \lambda_p + C_6 \quad (8)$$

$$\eta_p(\lambda_p) = C_7 \cdot \lambda_p^4 + C_8 \cdot \lambda_p^3 + C_9 \cdot \lambda_p^2 + C_{10} \cdot \lambda_p + C_{11} \quad (9)$$

где  $C_1 \dots C_{11}$  – коэффициенты, зависящие от количества лопастей, профиля и шагового отношения  $H/D$ .

Таким образом при  $H/D=1,25$   $\eta_{max} = 54\%$  при  $\lambda_p = 1,02$ , в то время как при  $H/D=1$   $\eta_{max} = 47\%$  при  $\lambda_p = 0,97$ . При различных режимах работы разброс КПД варьируется в широких пределах, так при низких скоростях  $\lambda_p = 0,5$  расхождение в КПД для разных шаговых отношений составляет 3%, а при  $\lambda_p = 1$  расхождение в КПД достигает 12%, что обусловлено падением тяговых характеристик для винтов с меньшим шаговым отношением. Установлено, что петлевидный винт с сегментным профилем, переменной шириной хорды (хорда уменьшается к втулочному сечению выходной части лопасти), с шаговым отношением  $H/D=1,25$  при рассмотренных условиях имеет наиболее высокий КПД по сравнению с аналогичными петлевидными винтами (№1, 2, 4) с другими значениями шага винта.

Расчетные зависимости кривых действия и КПД ПЛВ с двусторонним сегментным профилем при различном шаговом отношении  $H/D$  приведены на рис. 5. Аналогично винтам с сегментным профилем, винт №11 с большим шаговым отношением ( $H/D=1,8$ ) имеет высокие тяговые характеристики, но более низкие значения КПД. Максимальный КПД ПЛВ №9 с шаговым отношением  $H/D=1$  составляет 65% при  $\lambda_p = 0,75$ , что выше других рассмотренных вариантов с двусторонним сегментным профилем на 5÷15%.

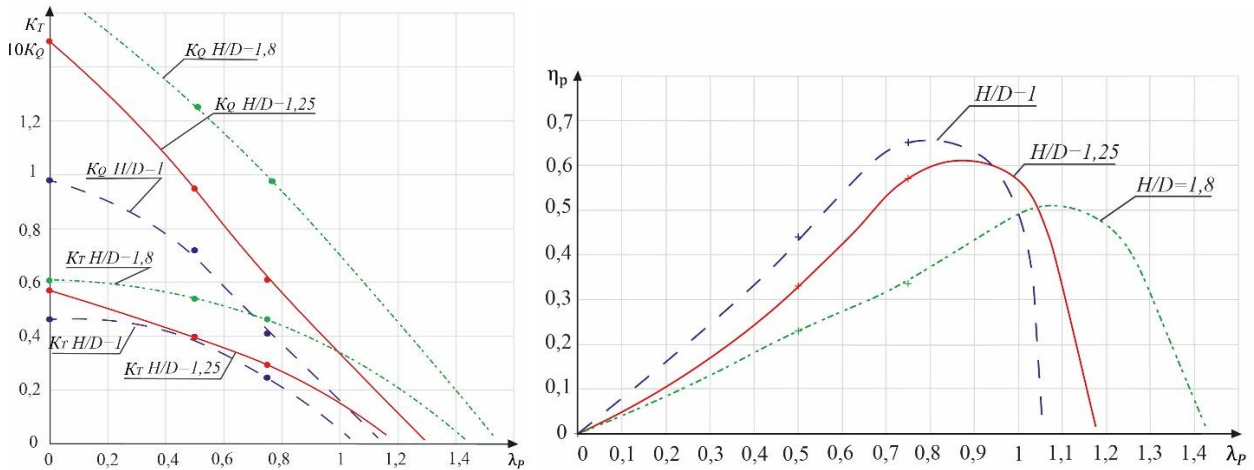


Рисунок 5. Кривые действия и КПД петлевидных винтов № 9–11:  
 — — — ПЛВ №9  $H/D=1$ ; — — — ПЛВ №10  $H/D=1,25$ ; ····· ПЛВ №11  $H/D=1,8$

Результаты моделирования рабочего процесса ПЛВ уменьшенной относительной толщины профиля (см. варианты № 5–7 рис. 3) представлены на рис. 6. Изменение относительной ширины профиля предполагает уменьшение ширины хорды  $b$  и, соответственно, максимальной толщины профиля лопасти  $e_m$ .

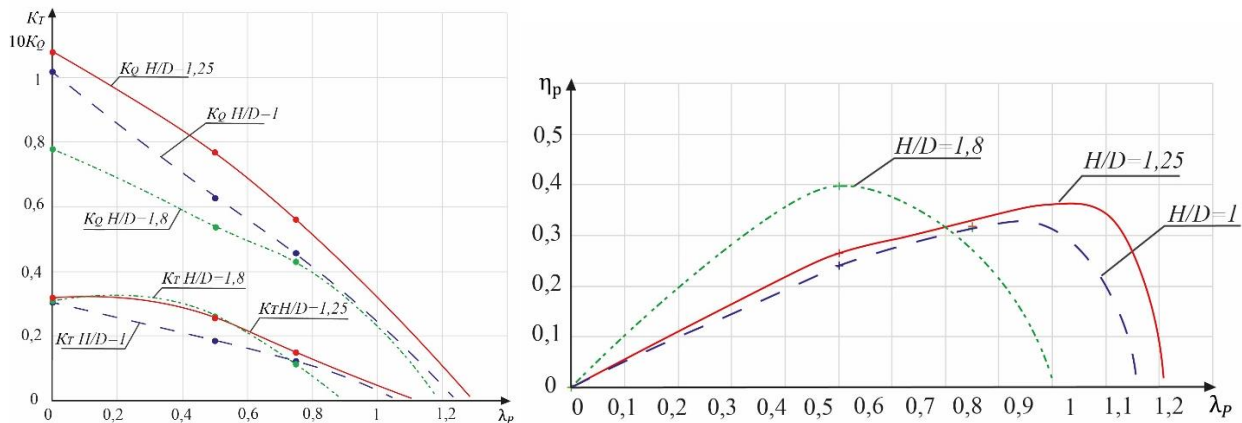


Рисунок 6. Кривые действия и КПД петлевидных винтов № 5–7  
 — — — ПЛВ №5  $H/D=1$ ; — — — ПЛВ №6  $H/D=1,25$ ; ····· ПЛВ №7  $H/D=1,8$

Кривые действия, представленные на рис. 5, 6 аналогично описываются полиномиальными зависимостями, согласно уравнениям 7–9. КПД ПЛВ с меньшей относительной толщиной профиля лопасти ( $e_m/b=0,06$ ) при большем шаговом отношении достигает максимальных значений при более низких значениях относительной поступи: абсолютное значение КПД не превышает 40% при  $\lambda_p = 0,5$ , что выше значений КПД при той же относительной поступи для винтов с большей относительной толщиной

( $e_m/b=0,1$ ) с сегментным профилем и сопоставимо с КПД для винтов с двусторонним сегментным профилем. Данное сочетание геометрических параметров ПЛВ не позволило достичь высоких значений КПД.

Результаты моделирования рабочего процесса ПЛВ с 4 лопастями (ГВ №8 см. рис. 3) показали, что увеличение количества лопастей повышает создаваемый упор, но не приводит к повышению КПД во всем диапазоне режимов работы.

Расчет ПЛВ №12, 13 (см. рис. 3) с аэродинамическим профилем лопасти выявил схожее с другими вариантами винтов протекание рабочего процесса, однако использование аэродинамического профиля не позволило достичь высоких значений КПД.

Основные расчетные параметры проанализированных вариантов петлевидных винтов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные расчетные параметры ПЛВ

№	Относительная поступь, $\lambda_p$	Максимальный КПД, $\eta_{max}$ , %	$K_T$	$K_Q$
1	0,93	45	0,13	0,04
2	0,96	48	0,17	0,05
3	1,02	52	0,20	0,06
4	0,99	49	0,34	0,11
5	0,95	32	0,06	0,02
6	1,05	38	0,08	0,03
7	0,5	40	0,29	0,05
8	0,89	54	0,34	0,08
9	0,92	58	0,41	0,10
10	0,76	54	0,27	0,06
11	0,8	65	0,20	0,04
12	0,85	61	0,36	0,08
13	1,1	51	0,50	0,14
14	0,92	41	0,11	0,04
15	1,1	36	0,14	0,07

Сопоставление полученных характеристик ПЛВ с разным профилем № 1–4 и № 9–11, при одинаковых шаговых отношениях, выявило что КПД винтов с двусторонним сегментным профилем во всех случаях выше (на 2 – 9%), кроме того двусторонний сегментный профиль проще в реализации

на производстве, что связано с особенностями геометрического построения пространственной петлевидной формы лопасти.

Исследование влияния ширины хорды профиля на характеристики петлевидного винта в целом показало, что более узкая передняя часть лопасти негативно сказывается на характере обтекания профилей лопасти, как и постоянная хорда по длине лопасти, что связано с особенностями распределения полей давления. Проведенный анализ позволил установить, что оптимальным, по распределению параметров потока, вариантом геометрии является лопасть с переменной по длине лопасти хордой, максимальная ширина хорды достигается на высоте наружного диаметра.

Расчетный максимальный КПД  $\eta_{max} = 65\%$ , полученный для ПЛВ с симметричным двусторонним сегментным профилем и шагом  $H/D=1$ , что выше аналогичного традиционного ГВ на 10%, позволяет сделать вывод о целесообразности использования данного типа профиля и шага у петлевидных винтов.

Разработана математическая модель ПЛВ, позволяющая рассчитывать характеристики винтов с учетом кавитации, моделировать влияние геометрических параметров на параметры рабочего процесса.

Результатом исследования с использованием разработанной математической модели стало конструктивно-компоновочное схемное решение петлевидного винта с наиболее высокими расчетными параметрами

**В третьей главе** разработана методика проведения испытаний, выполнены экспериментальные исследования рабочего процесса винта с петлевидными лопастями, по результатам которых выполнена верификация разработанной математической модели.

Экспериментальные исследования являются неотъемлемой частью проведения поисковых научных исследований. Данный этап исследования позволяет верифицировать результаты численного моделирования, выявить возможные расхождения между теоретическими предположениями и реальными характеристиками, что дает возможность определить направления совершенствования разработанной математической модели.

Разработана экспериментальная установка на базе маломерного судна «Крым-1» с подвесным лодочным мотором 25 л.с. (18,4 кВт), схема установки петлевидного винта и принцип работы поясняется рисунком 7.

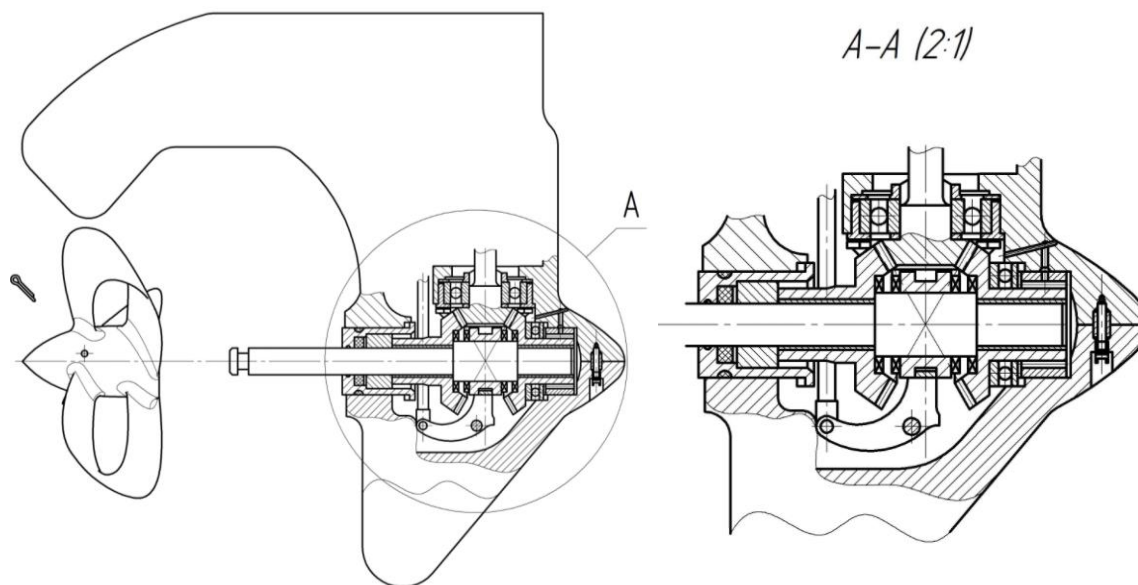


Рисунок 7. Схема установки ПЛВ

Корпус редуктора крепится винтами к нижнему фланцу дейдвудной трубы, при работе подвесного лодочного мотора редуктор находится под водой и должен быть герметичен во избежание утечки масла и попадания воды во внутреннюю полость редуктора. Уплотнение осуществляется резиновыми кольцами и сальниковыми уплотнениями. Крутящий момент двигателя передается на лопастной винт через шпоночное соединение, в осевом перемещении винт фиксируется шплинтом, проходящем через кольцевую канавку гребного вала.

Для проведения испытаний, по разработанным 3D-моделям с использованием аддитивных технологий был изготовлен лопастной винт из коррозионностойкой стали (рис.8, а), в винт запрессована резиновая втулка для компенсации вибраций и обеспечения упругого соединения с валом. Финишная обработка опытного образца петлевидного винта заключалась в шлифовании поверхностей лопастей и ступицы, шероховатость поверхностей после обработки составляет Ra1.6, это необходимо для обеспечения высоких значений КПД (рис.8, б).



а)

б)

Рисунок 8. Петлевидный винт, 3D-печать из металла:

*а – опытный образец; б – финишная обработка*

Испытания включали в себя несколько этапов с выполнением измерений тяговых и скоростных характеристик штатного и петлевидного винтов. Результаты экспериментальных исследований развиваемого винтами усилия представлены в таблице 2 и на графике рис.9, где штриховой линией обозначены усилия, полученные по результатам численного моделирования на больших оборотах и аппроксимированные с результатами экспериментальных исследований.

Таблица 2. Усилие, развиваемое винтами

Обороты двигателя, об/мин (об/с)	Развиваемое усилие, Н	
	Штатный винт	Петлевидный винт
2000 (33,33)	632	684
2400 (40)	805	877
3000 (50)	1008	949
3200 (53,33)	1076	1012

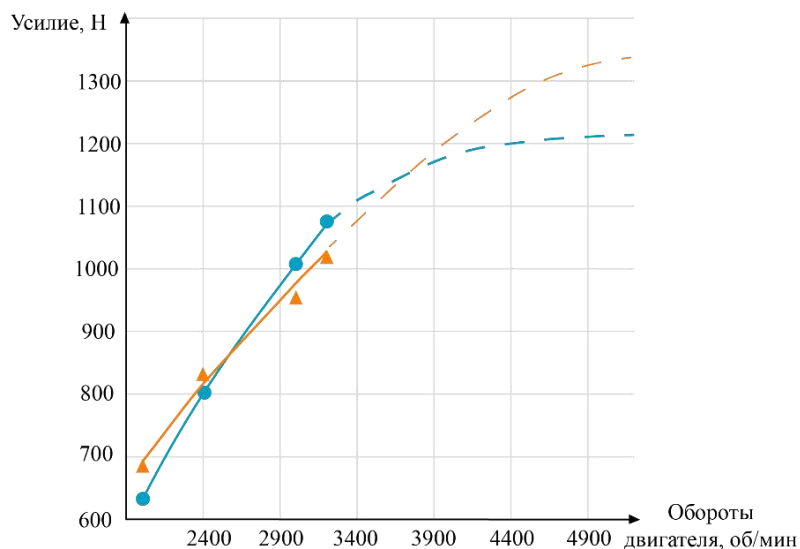


Рисунок 9. Усилие, развиваемое винтами:

● – Штатный «грузовой» винт; ▲ – Петлевидный винт

Результаты испытаний показали, что петлевидный винт является «гидродинамически тяжелым». Петлевидный винт имеет выраженный тяговый характер, на одинаковых режимах работы двигателя в районе 3000 об/мин развиваемое усилие в сравнении со штатным, позволяющим развивать наибольшее тяговое усилие, имеет близкое значение – расхождение составляет 6%, однако стоит учитывать, что номинальным режимом работы двигателя является режим высоких оборотов 4500–5000 об/мин.

Верификация результатов численного моделирования рабочего процесса петлевидного винта подтверждает высокую сходимость характеристик разработанной математической модели с экспериментальными данными (Сопоставление результатов экспериментальных исследований и численного моделирования с соответствующими оборотами показало максимальное расхождение параметров 8%).

По результатам экспериментальных данных выполнено определение рациональных геометрических параметров ПЛВ, с увеличением шагового отношения ( $H/D=1,2$ ) и уменьшением относительной толщины лопасти ( $e_m/b=0,08$ ), что для рассматриваемых условий позволило повысить КПД ПЛВ на 8% и увеличить развиваемое тяговое усилие на 5%.

**В четвертой главе** разработана методика проектирования петлевидного винта, позволяющая рассчитывать и исследовать петлевидные винты для двигателей мощностью от 11 до 110 кВт (от 15 до 150 л.с.).

Предлагаемый подход к проектированию петлевидных винтов основывается на универсальном методе Папмеля с учетом специфичности геометрической формы и параметров петлевидных винтов. Диаграммы Папмеля получены расчетным путем применительно к полноразмерным винтам, а не построены на базе обработки результатов модельных испытаний. Предлагаемый подход предполагает использование численного моделирования с применением методов вычислительной гидродинамики, позволяющего не только сократить сроки проектирования, но и объемы доводочных работ.

Обобщение результатов моделирования позволили выполнить систематизацию численных экспериментов для номенклатурного ряда

петлевидных винтов с целью получения диаграмм (зависимости коэффициента упора  $K_T$  и КПД  $\eta_p$  от относительной поступи  $\lambda_p$ ) и адаптации универсального метода Папмеля для условий работы ПЛВ. На рис. 10 представлены диаграммы для двух-, трех- и четырехлопастных ПЛВ с различным шаговым отношением. Диаграммы, приведенные на рис. 10, построены для винтов идентичной формы контура петли лопасти, относительной длины профилей передней и задней части петли, относительной толщины профиля и дискового отношения.

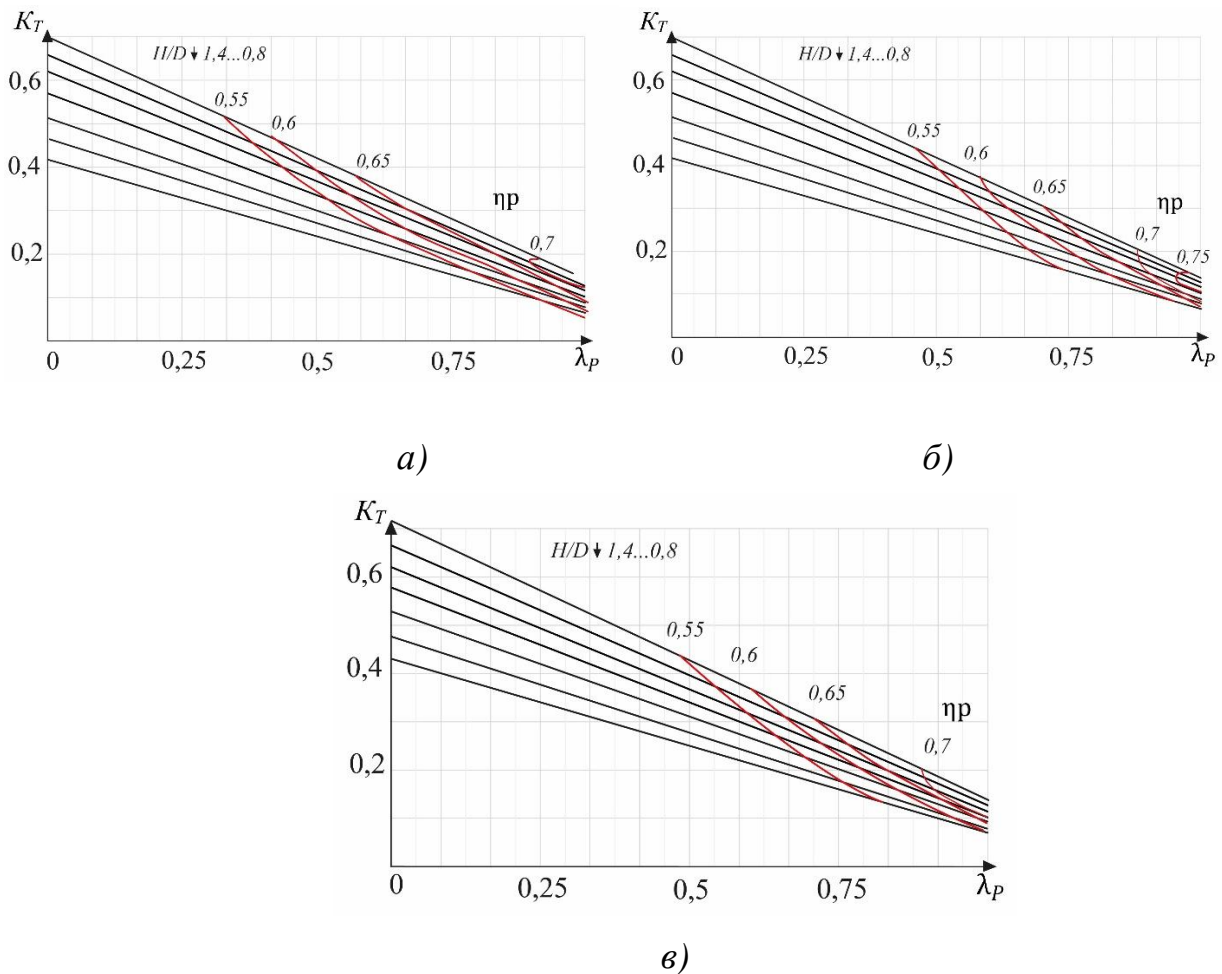


Рисунок 10. Диаграммы петлевидного винта:  
*а – двухлопастной; б – трехлопастной; в – четырехлопастной*

Линии постоянных значений КПД, получены путем проецирования точек пересечения линий КПД с кривыми коэффициента упора, построенных в единой системе координат предложенные диаграммы могут использоваться для выбора и расчета ПЛВ.

Алгоритмический подход в виде блок-схем по выбору и расчету ПЛВ представлены на рис.11 и 12.

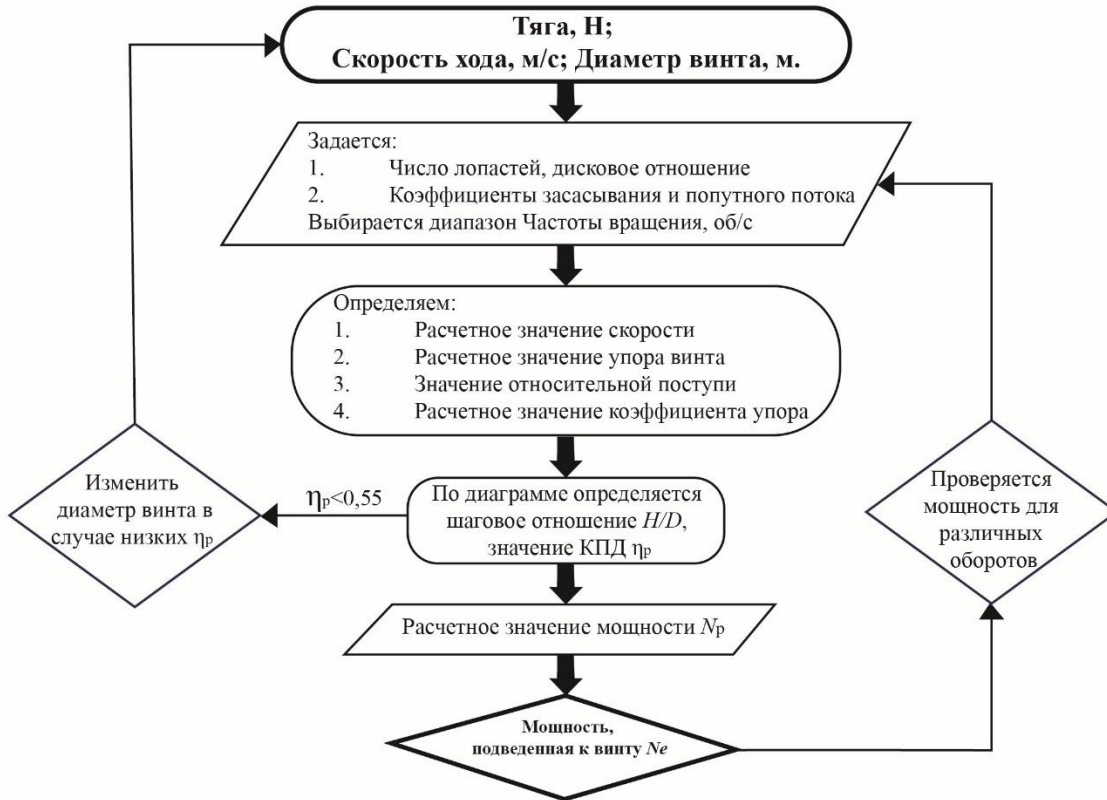


Рисунок 11. Блок-схема подбора ПЛВ по упору

Порядок выполнения расчетов, приведенный на рис. 11, заключается в подборе ПЛВ при известном необходимом упоре (сопротивлении судна) и выборе соответствующего двигателя, определение необходимой мощности  $N_e$  при заданной скорости хода судна.

Порядок выполнения расчетов, приведенный на рис. 12, заключается в подборе ПЛВ, позволяющего развить наибольшую скорость при заданных параметрах энергетической установки (известной мощности энергетической установки и частоте вращения вала с учетом передаточного числа редуктора при его наличии).

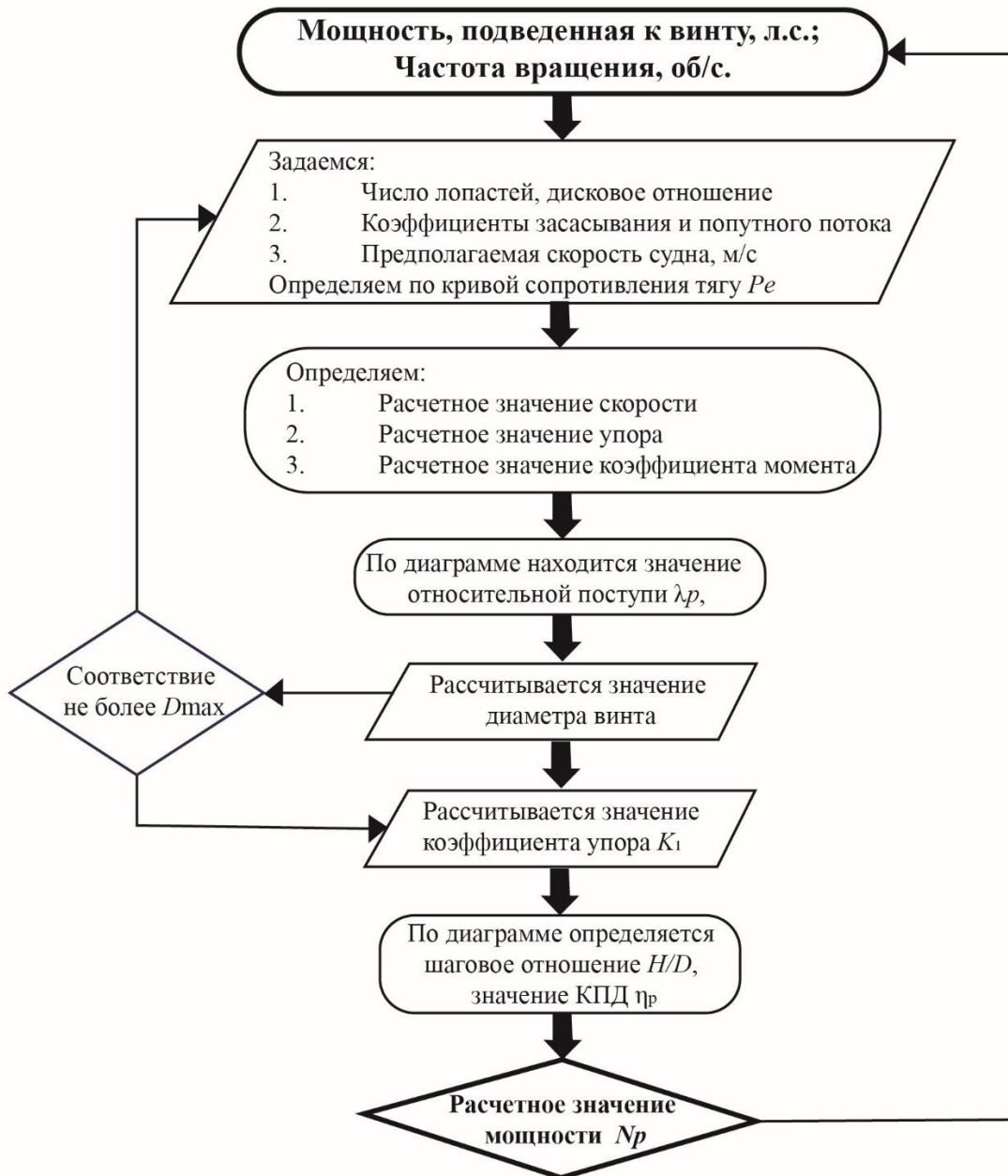


Рисунок 12. Блок-схема подбора ПЛВ по скорости

Стоит отметить необходимость выполнения дополнительных расчетов и исследований кавитационных явлений и акустического шума, возникающих при работе лопастных винтов. Расчет ПЛВ в более широком мощностном диапазоне представляется возможным при проведении численного моделирования рабочего процесса согласно математической модели, изложенной во второй главе.

Проектирование высокоэффективных лопастных винтов позволит повысить гидродинамическое совершенство пропульсивного комплекса,

скорость судна, значительно улучшить экологические аспекты (такие как топливная эффективность, снижение шума). Параметрическая оптимизация геометрии лопастного винта направлена на повышение гидродинамического совершенства винта, достижения гидродинамических характеристик, превосходящих классические, традиционные схемные решения лопастных винтов на 10–15%. Важным и необходимым аспектом повышения гидродинамического совершенства и эффективной работы гребного винта является обеспечение согласованного режима работы всех элементов пропульсивного комплекса судна.

Результаты диссертационного исследования направлены на создание более совершенных и энергоэффективных схемных решений лопастных гидравлических машин. Универсальность полученных результатов обеспечивает возможность применения петлевидных лопастных машин в судостроении и в технологическом оборудовании в качестве перемешивающих устройств.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Аналитический обзор конструктивно-компоновочных и схемных решений ЛГМ и судовых движителей, в частности, позволил определить основные конструктивные и кинематические параметры, влияющие на характеристики ЛВ, сформировать энергоэффективные схемные решения петлевидного винта и определить наиболее перспективные направления исследований петлевидных ЛВ.

2. Разработана математическая модель с учетом кавитации. Исследование влияния геометрических параметров на гидродинамические параметры позволило оптимизировать конструктивно-компоновочное схемное решение петлевидного винта.

Установлено, что расчетный максимальный КПД  $\eta_{max} = 65\%$ , достигается петлевидным винтом с симметричным двусторонним сегментным профилем и шагом  $H/D=1$ , что выше аналогичного традиционного гребного винта на 10%. Разработанную математическую модель рекомендуется

применять при численном моделировании петлевидных винтов для получения интегральных характеристик рабочего процесса во всем диапазоне рабочих оборотов двигателя.

3. Экспериментальные исследования позволили верифицировать результаты численного моделирования, сравнение тяговых характеристик натурных испытаний и интегральных значений моделирования имеет максимальное расхождение 8%. Натурные испытания позволили установить, что петлевидный винт имеет выраженный тяговый характер.

Определение рациональных геометрических параметров ПЛВ, с увеличением шагового отношения и уменьшением относительной толщины лопасти, позволило повысить КПД ПЛВ для рассматриваемых условий на 8% и увеличить развиваемое тяговое усилие на 5%.

4. Разработанную методику проектирования рекомендуется применять для расчета петлевидных винтов для двигателей мощностью от 11 до 110 кВт, характерных для маломерных судов.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ**

По результатам выполненных исследований опубликовано 12 печатных работ, в том числе 3 публикации в рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК, получено 3 патента РФ.

Список основных работ по теме диссертации:

*В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК:*

1. Шабельник Ю.А. О способах повышения эффективности водоходных движителей / А.В. Месропян, Ю.А. Шабельник // Вестник ДГТУ. – Махачкала, 2021. – Т. 48, №3. – С. 39–51.

2. Шабельник Ю.А. К вопросу об эффективности рабочего процесса петлевидных гребных винтов / А.В. Месропян, Ю.А. Шабельник // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. Омск, 2023. – Т. 7, №2. – С. 15–21.

3. Шабельник Ю.А. Анализ эффективности гребных винтов различных схем на основе численного моделирования рабочих процессов / А.В. Месропян, Ю.А. Шабельник // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. Омск, 2025. – Т. 9, № 4. – С. 5–12.

*Патенты РФ:*

4. Месропян А.В., Шабельник Ю.А. Петлевидный гребной винт. Патент РФ № 2780771–№2022106691 заявл. 15.03.2022, опубл. 30.09.2022

5. Месропян А.В., Шабельник Ю.А. и др. Водомерный движитель. Патент РФ №2847865–№2024130291, заявл. 07.10.2024, опубл. 15.10.2025, Бюл. №29

6. Месропян А.В., Шабельник Ю.А. Гребной винт. Патент РФ №2849218–№2025100507, заявл. 10.01.2025, опубл. 23.10.2025, Бюл. №30

*В других изданиях:*

7. Шабельник Ю.А. О влиянии параметров сеточной модели при формировании расчетной области на примере гребного винта / А. В. Месропян, Ю.А. Шабельник // Вестник УГАТУ. – Уфа, 2021. – Т.25, №2(92). – С. 41–47.

8. Шабельник Ю.А. Перспективы реализации электродвижения в маломерном судостроении / А.В. Месропян, А.М. Галицына, А.П. Меркулова, Ю.А. Шабельник // Электротехнические системы и комплексы. – Магнитогорск, 2023. – №2 (59). – С. 49–54.

9. Шабельник Ю.А. К вопросу о повышении эффективности гребных винтов / А.М. Галицына, А.В. Месропян, Ю.А. Шабельник // XXIV Международная научно-техническая конференция «Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика». НИУ МЭИ – М.: Мир науки, 2020. – С. 74–81.

10. Шабельник Ю.А. Численное моделирование работы гребного винта / А.В. Месропян, Ю.А. Шабельник // V международная научно-техническая конференция «Мавлютовские чтения», Уфа: УГАТУ, 2021. – Том 4. – С. 140–144.

11. Шабельник Ю.А. К вопросу о кавитационном шуме гребных винтов. // Мавлютовские чтения: материалы XVI всероссийской молодежной научной конференции: в 6 томах [Электронный ресурс], Уфа: УГАТУ, 2022. – Том 1. – С. 377–380.

12. Шабельник Ю.А. Петлевидные винты / А.В. Месропян, Ю.А. Шабельник // Перспективы развития двигателестроения: материалы докладов международной научно-технической конференции 21–23 июня 2023 г.: в 2 томах, том 2. – Самара: Издательство Самарского университета, 2023 С. 51–53.

Диссертант



Ю.А. Шабельник

ШАБЕЛЬНИК Юлия Андреевна

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ МАШИНЫ С ПЕТЛЕВИДНЫМИ ЛОПАСТЯМИ.  
ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА

Специальность:

2.5.10 – Гидравлические машины, вакуумная,  
компрессорная техника, гидро- и пневмосистемы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать 29.06.2026. Формат 60×90 1/16  
Усл. печ. л. 1,61. Уч.-изд. л. 0,94. Тираж 100 экз. Заказ № 14.

Учебный научно-производственный центр «Издательство  
Уфимского государственного нефтяного технического университета»

Адрес УНПЦ «Издательство УГНТУ»:  
450064, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1

Адрес типографии: 450078, Республика Башкортостан,  
г. Уфа, ул. Чернышевского, д. 145