

На правах рукописи

Клековкин Антон Владимирович

**Исследование динамики безвинтовых роботов в жидкости с
неизменяемой формой оболочки и управляемых внутренними
роторами**

Специальность 05.02.05 —
«Роботы, мехатроника и робототехнические системы»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Ижевск — 2020

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова».

Научный руководитель: **Мамаев Иван Сергеевич**
доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры «Мехатронные системы» ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова»

Официальные оппоненты: **Яцун Сергей Федорович**,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Механика, мехатроника и робототехника»,
ФГБОУ ВО "Юго-западный государственный университет"

Ардентов Андрей Андреевич,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник «Исследовательского центра процессов управления»,
«Института программных систем имени А.К. Айламазяна Российской академии наук»

Ведущая организация: «Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук»

Защита состоится **DD mmmmmmmmm YYYU г. в XX часов** на заседании диссертационного совета Д 212.028.11 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный технический университет» по адресу: 400005, г. Волгоград, проспект им. В.И. Ленина, д. 28.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО "ВолГТУ" и на сайте <http://www.vstu.ru/>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 400005, г. Волгоград, проспект им. В.И. Ленина, д. 28, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.028.11.

Автореферат разослан **DD mmmmmmmmm YYYU года**.

Телефон для справок: +7 (8442) 230-076.

ВрИО ученого секретаря
диссертационного совета
Д 212.028.11,
д.т.н, профессор

Балакина Екатерина Викторовна

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования.

В настоящее время активно проводятся исследования, направленные на создание робототехнических систем, использующих нетрадиционные способы перемещения в жидкости. К подобным робототехническим системам относят водные роботы, передвигающиеся посредством имитирования движения живых существ или благодаря наличию внутренних подвижных механизмов, обеспечивающих изменение положения центра масс или кинетического момента.

Подводные и надводные роботы, управляемые внутренними механизмами, реализуют способ передвижения в жидкости, при котором форма оболочки робота остается неизменной и отсутствуют приводные элементы, которые взаимодействуют непосредственно с жидкостью или воздухом над ее поверхностью. Движение осуществляется за счет внутренних механизмов робота, которые могут изменять положение центра масс мобильного робота или внутренний гиростатический момент. Основными преимуществами данных роботов, перемещающихся в жидкости, являются отсутствие внешних подвижных элементов, простота конструкции, возможность полной гидроизоляции. В связи с этим данные роботы имеют преимущества в некоторых задачах перед другими роботами: работа на большой глубине с высоким давлением, работа в агрессивных средах или средах с высокой плотностью растительности.

Одни из первых теоретических исследований в данной области представлены в работах В. В. Козлова, С. М. Рамоданова, Д. А. Онищенко, в которых была показана возможность неограниченного продвижения тела в рамках модели идеальной жидкости при анизотропии присоединенных масс. В работах Ф. Л. Черноусько, Н. Н. Болотника рассмотрены модели движения с заданными законами сопротивления. С. Ф. Яцун с соавторами рассматривали различные математические модели плавающих роботов, приводимых в движение посредством периодических перемещений внутренних масс. Численное моделирование движения объекта с изменяемым центром масс в жидкости на основе совместного решения уравнений Навье-Стокса и уравнений динамики твердого тела проводилось В. А. Тененёвым, Е. В. Ветчаниным с соавторами. В работах А. А. Килина и А. И. Кленова рассмотрена локомоционная мобильная платформа, перемещающаяся по поверхности жидкости за счет изменения распределения масс. Из зарубежных ученых, работающих по данной тематике, можно выделить С. Чилдресса, Ф. Таллапрагаду, С. Д. Келли. В своих исследованиях С. Чилдресс рассматривает влияние вязкости на самопродвижение твердого тела переменной формы с движущейся внутри него массой. Ф. Таллапрагада и С. Д. Келли были проведены одни из немногих экспериментальных исследований движения водного робота за счет вращения внутреннего ротора.

Результаты исследований, полученные в данной области, подтверждают сложность динамики движения подобных систем, а также неочевидность процесса формирования управления для реализации движения вдоль простых

траекторий. В связи с этим проведение теоретических и экспериментальных исследований водных роботов, использующих внутренние механизмы для продвижения в жидкости, является актуальным.

В данной работе проведены исследования двух объектов: безвинтового подводного робота с осесимметричной оболочкой и безвинтового надводного робота с оболочкой, имеющей форму симметричного профиля с острой кромкой. Оба робота передвигаются за счет изменения гиросtatического момента, возникающего за счет вращения роторов, расположенных внутри оболочки.

Безвинтовой подводный робот с осесимметричной оболочкой может двигаться как при частичном, так и при полном погружении. Для описания его движения разработана трехмерная математическая модель в рамках теории идеальной жидкости. Безвинтовой надводный робот с оболочкой, имеющей форму симметричного профиля с острой кромкой, движется по поверхности жидкости. Разработана математическая модель, описывающая плоскопараллельное движение робота и учитывающая сопротивление жидкости. На основе математических моделей сформированы режимы управления роторами для различных типов движения для каждого из роботов, проведены экспериментальные исследования.

Целью данной работы является исследование принципов движения роботов в жидкости, управляемых внутренними механизмами, и разработка алгоритмов управления их движением.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Построение и исследование математической модели движения в жидкости безвинтового подводного робота с механизмами, обеспечивающими создание внутреннего гиросtatического момента.
2. Разработка алгоритма управления движением в жидкости безвинтового подводного робота на базе предложенной математической модели.
3. Построение и исследование математической модели движения безвинтового надводного робота, перемещающегося по поверхности жидкости за счет изменения внутреннего гиросtatического момента.
4. Разработка алгоритма управления движением по поверхности жидкости безвинтового надводного робота на базе предложенной математической модели.
5. Анализ и синтез механизмов, обеспечивающих изменение внутреннего гиросtatического момента, и разработка конструкции прототипов водных роботов: безвинтовых подводного и надводного роботов; разработка систем управления.
6. Создание натуральных образцов и методик экспериментальной оценки характеристик их движения в жидкости.
7. Проведение экспериментальных исследований и сравнение полученных данных с результатами численного моделирования для оценки разработанных алгоритмов управления.

Научная новизна заключается в разработанных математических моделях движения в жидкости роботов, управляемых внутренними механизмами, в алгоритмах управления, построенных на базе предложенных математических моделей, и результатах их экспериментальной апробации.

Практическая значимость. Результаты, полученные в диссертации, могут быть использованы для разработки новых или усовершенствования существующих водных мобильных аппаратов. Полученные теоретические модели движения могут использоваться для вычисления оптимальных конструкционных параметров механизмов мобильных роботов, перемещающихся в жидкости. Также разработанные математические модели позволяют определить управляющие воздействия для элементарных маневров, которые можно комбинировать и использовать при перемещении роботов подобной конструкции по сложной траектории. Таким образом, работа с рассматриваемыми роботами позволяет проводить полноценные исследования движения мобильных водных роботов, что делает их наглядным лабораторным комплексом, который можно использовать в учебном процессе.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных в рамках диссертационного исследования задач использовались аналитические и численные методы решения уравнений динамики. Для вычисления коэффициентов присоединенных масс и коэффициентов вязкого сопротивления в математической модели движения безвинтового надводного робота с острой кромкой использовался метод численного решения уравнений Навье-Стокса. При проведении экспериментальных исследований движения роботов использовалась система захвата движения. Обработка данных, полученных из экспериментов, проводилась с использованием программных комплексов Matlab, Maple. Программное обеспечение управления роботами для микроконтроллеров разрабатывалось на языке программирования Си в среде Keil uVision.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель движения в жидкости безвинтового подводного робота за счет изменения внутреннего гиростатического момента.
2. Математическая модель движения безвинтового надводного робота, перемещающегося по поверхности жидкости за счет изменения внутреннего гиростатического момента, с учетом вязкого сопротивления среды.
3. Алгоритм управления движением по поверхности жидкости безвинтового надводного робота за счет изменения внутреннего гиростатического момента.
4. Конструкции безвинтовых подводного и надводного роботов, реализующих движение в жидкости за счет изменения внутреннего гиростатического момента.

5. Результаты экспериментальных исследований по оценке разработанных алгоритмов управления для безвинтовых подводного и надводного роботов.

Область исследования. Диссертационная работа выполнена в соответствии с паспортом специальности ВАК 05.02.05 — «Роботы, мехатроника и робототехнические системы» по пунктам:

1. Методы анализа и оптимизационного синтеза роботов, робототехнических и мехатронных систем.

2. Математическое моделирование мехатронных и робототехнических систем, анализ их характеристик методами компьютерного моделирования, разработка новых методов управления и проектирования таких систем.

Достоверность. Разработанные математические модели основаны на классических утверждениях и теоремах и не противоречат известным результатам. Для решения и исследования полученных уравнений применялись апробированные аналитические и численные методы. Достоверность подтверждается согласованностью математической модели с результатами натурных экспериментов. Для проведения экспериментальных исследований использовались современные измерительные комплексы.

Апробация работы. Основные результаты работы обсуждались на семинарах кафедры «Мехатронные системы» ФГБОУ ВПО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», «Института компьютерных исследований» ФГБОУ ВПО «Удмуртский государственный университет», Центра технологий компонентов робототехники и мехатроники Университета Иннополис.

Кроме того, результаты исследований, изложенные в диссертации, были представлены в докладах на российских и международных конференциях: Международная конференция «GDIS-2016» (Ижевск, 2016 г.), Международная конференция МИКМУС-2018 (Москва, 2018 г.), Международная конференция "Scientific Heritage of Sergey A. Chaplygin: nonholonomic mechanics, vortex structures and hydrodynamics" (Чебоксары, 2019 г.), Международная конференция "Экстремальная робототехника-2019" (Санкт-Петербург, 2019 г.), Международная конференция CLAWAR-2020 (Москва, 2020 г.).

Личный вклад. Постановки задач, обсуждение результатов проводились совместно с руководителем и соавторами работ. Соискателем разработаны математические модели, прототипы мобильных платформ, программное обеспечение для управления мобильными роботами; проведены численные и натурные эксперименты, проведена обработка результатов экспериментов.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 11 работах, 3 из которых опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК, из них 2 работы изданы в научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus. Одна статья опубликована в сборниках докладов конференций, индексируемых Scopus, 4 — в сборниках докладов и тезисах конференций. Получен патент на полезную модель и 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, семи глав и заключения. Полный объем диссертации составляет **131** страницу текста с **80** рисунками и **12** таблицами. Список литературы содержит **87** наименований.

Содержание работы

Во **введении** описана актуальность исследований, приводится обзор существующих исследований по изучаемой тематике, формулируется цель, определяются задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной цели, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

В **первой главе** представлен обзор и анализ существующих механизмов движения мобильных плавающих роботов. Рассмотрены основные подходы к математическому описанию движения объектов, перемещающихся в жидкости. Выделены наиболее популярные способы перемещения в жидкости среди мобильных роботов: использование гребных винтов; движение за счет изменения формы оболочки; движение за счет использования реактивного привода и движение за счет использования внутренних механизмов. По каждому из способов перемещения проведен обзор существующих моделей мобильных роботов, рассмотрены конструкции и математические модели движения. Подробно представлены актуальные исследования по перемещению объектов в жидкости за счет внутренних механизмов.

Во **второй главе** представлена математическая модель трехмерного движения в жидкости безвинтового подводного робота с внутренними роторами. Безвинтовой подводный робот рассматривается в виде системы, состоящей из жесткой внешней оболочки, имеющей форму эллипсоида вращения, и трех внутренних роторов (рисунок 1).

Уравнения движения рассматриваемой системы записаны с помощью классических уравнений Кирхгофа:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \mathbf{V}} \right) + \boldsymbol{\Omega} \times \frac{\partial T}{\partial \mathbf{V}} = 0, \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \boldsymbol{\Omega}} \right) + \boldsymbol{\Omega} \times \frac{\partial T}{\partial \boldsymbol{\Omega}} + \mathbf{V} \times \frac{\partial T}{\partial \mathbf{V}} = 0$$

где \mathbf{V} и $\boldsymbol{\Omega}$ — скорость центра оболочки и его угловая скорость, T — суммарная кинетическая энергия, состоящая из кинетической энергии оболочки, кинетической энергии жидкости и кинетической энергии каждого ротора.

Данные уравнения необходимо дополнить уравнениями эволюции переменных (\mathbf{r}, \mathbf{Q}) , которые описываются уравнениями Пуассона и кинематическими соотношениями следующего вида

$$\dot{\boldsymbol{\alpha}} = \boldsymbol{\alpha} \times \boldsymbol{\Omega}, \quad \dot{\boldsymbol{\beta}} = \boldsymbol{\beta} \times \boldsymbol{\Omega}, \quad \dot{\boldsymbol{\gamma}} = \boldsymbol{\gamma} \times \boldsymbol{\Omega}, \quad \dot{\mathbf{r}} = \mathbf{Q}^T \mathbf{V}. \quad (1)$$

где $\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\gamma}$ орты неподвижных осей $Oxyz$, спроецированные на подвижные оси e_1, e_2, e_3 , \mathbf{Q} ортогональная матрица, состоящая из компонент векторов $\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\gamma}$.

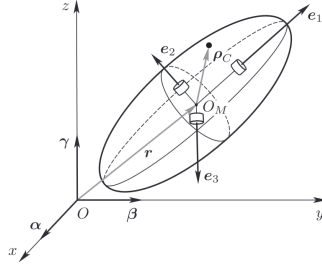


Рисунок 1 — Схематическая модель безвинтового подводного робота с внутренними роторами, где $Oxyz$ — неподвижная система координат, $O_M e_1 e_2 e_3$ — подвижная система координат, O_M — геометрический центр эллипсоида, $\mathbf{r} = (x, y, z)$ — радиус-вектор объекта, ρ_C — вектор центра масс системы в подвижной системе координат

После подстановки кинетической энергии в уравнения Кирхгоффа уравнения движения принимают вид

$$\begin{aligned} \mathbf{C}\dot{\mathbf{V}} + \mathbf{B}\dot{\boldsymbol{\Omega}} &= (\mathbf{C}\mathbf{V} + \mathbf{B}\boldsymbol{\Omega}) \times \boldsymbol{\Omega}, \\ \mathbf{B}^T \dot{\mathbf{V}} + \mathbf{I}\dot{\boldsymbol{\Omega}} + \dot{\mathbf{K}}(t) &= (\mathbf{B}^T \mathbf{V} + \mathbf{I}\boldsymbol{\Omega} + \mathbf{K}(t)) \times \boldsymbol{\Omega} + (\mathbf{C}\mathbf{V} + \mathbf{B}\boldsymbol{\Omega}) \times \mathbf{V} \end{aligned} \quad (2)$$

где \mathbf{I} — тензор инерции всей системы, вычисленный относительно геометрического центра оболочки, матрицы \mathbf{B} и \mathbf{C} зависят от распределения масс и формы оболочки, $\mathbf{K}(t)$ — вектор гиростатического момента.

Уравнения (2) можно записать в форме импульса и момента импульса:

$$\dot{\mathbf{P}} = \mathbf{P} \times \boldsymbol{\Omega}, \quad \dot{\mathbf{M}} = \mathbf{M} \times \boldsymbol{\Omega} + \mathbf{P} \times \mathbf{V}, \quad (3)$$

где $\mathbf{P} = \frac{\partial T}{\partial \mathbf{V}}$ и $\mathbf{M} = \frac{\partial T}{\partial \boldsymbol{\Omega}}$ имеют гидродинамический смысл и называются, соответственно, импульсивным моментом и импульсивной силой¹.

Уравнения (1) допускают шесть геометрических интегралов движения:

$$\alpha^2 = \beta^2 = \gamma^2 = 1, \quad (\alpha, \beta) = (\alpha, \gamma) = (\beta, \gamma) = 0.$$

Уравнения (3) допускают еще шесть первых интегралов движения:

$$(\mathbf{P}, \alpha), (\mathbf{P}, \beta), (\mathbf{P}, \gamma), (\mathbf{M} + \mathbf{r} \times \mathbf{P}, \alpha), (\mathbf{M} + \mathbf{r} \times \mathbf{P}, \beta), (\mathbf{M} + \mathbf{r} \times \mathbf{P}, \gamma) \quad (4)$$

В случае движения из состояния покоя первые интегралы (4) приобретают особенно простой вид: $\mathbf{P} = 0$, $\mathbf{M} = 0$.

¹Борисов, А. В. Динамика твердого тела / А. В. Борисов, И. С. Мамаев. М. – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2005. 576 с.

Таким образом, при движении из состояния покоя система уравнений, описывающих эволюцию ориентации и траектории движения при заданном управлении, имеет вид:

$$\begin{aligned}\dot{\alpha} &= \tilde{\mathbf{I}}\mathbf{K}(t) \times \alpha, \quad \dot{\beta} = \tilde{\mathbf{I}}\mathbf{K}(t) \times \beta, \quad \dot{\gamma} = \tilde{\mathbf{I}}\mathbf{K}(t) \times \gamma, \\ \dot{\mathbf{r}} &= \mathbf{Q}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{B} \tilde{\mathbf{I}}\mathbf{K}(t),\end{aligned}\tag{5}$$

где $\tilde{\mathbf{I}} = (\mathbf{I} - \mathbf{B}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{B})^{-1}$.

В системе уравнений (5) вектор гиросtatического момента $\mathbf{K}(t)$ является управляющим воздействием, так как зависит от угловых скоростей роторов:

$$\mathbf{K}(t) = \sum_{k=0}^3 i_k \omega_k(t) \mathbf{n}_k.$$

Далее в главе полученная система исследована на управляемость с использованием теоремы Рашевского-Чжоу². Показано, что для того, чтобы получить управляемый объект с формой оболочки в виде эллипсоида вращения с центром масс всей системы в геометрическом центре эллипсоида, необходимо внести асимметрию в форму. Это можно сделать, добавив к оболочке винтовые лопасти. Так объект будет представлять из себя трехлопастной винт.

Далее произведено моделирование траекторий движения при вращении роторов с постоянной скоростью с использованием полученной модели движения.

В третьей главе описана конструкция безвинтового подводного робота с внутренними роторами.

Безвинтовой подводный робот является мобильным роботом в форме эллипсоида вращения с лопастями и представляет собой сборную конструкцию (рисунок 2). Основой конструкции является оболочка, составленная из двух одинаковых половин 1, присоединенных друг к другу по экваториальной плоскости с помощью перегородки 2. К оболочке крепятся лопасти 3. Размер эллипсоида составляет 300 х 200 мм.

Внутри корпуса робота три пары роторов установлены таким образом, что оси роторов расположены под углом 90° по отношению друг к другу. Ось одной из пар роторов направлена вдоль оси вращения эллипсоида, а две другие пары расположены в экваториальной плоскости. Система роторов подводного робота включает пару роторов большего размера 4 и две пары роторов меньшего размера 5. Для погружения робот оснащен механизмом регулировки плавучести 6. Модули плавучести имеют в своем составе поворотный пневмоцилиндр 7 с приводом 8. Для придания роботу формы винтового тела к оболочке крепятся 3 лопасти. Полученное винтовое тело имеет диаметр винта 300 мм, угол наклона лопасти гребного винта к оси вращения эллипсоида

²Рашевский, П. О соединимости любых двух точек вполне неголономного пространства допустимой линией / П. Рашевский // Учен. зап. Пед. ин-та им. Либкнехта, сер. физ.-матем. 1938. т. 3, № 2. с. 83—94.

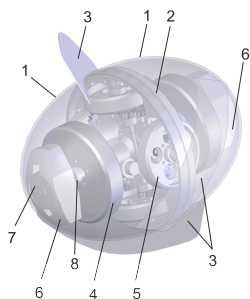


Рисунок 2 — Конструкция и корпусные элементы экспериментальной модели безвинтового подводного робота — 45°. Фотографии робота в сборе и без половины оболочки представлены на рисунке 3.



а) б)
Рисунок 3 — Фотографии безвинтового подводного робота

Управление роботом осуществляется с помощью микроконтроллера, который управляет двигателями постоянного тока, обрабатывает данные с датчиков обратной связи, а также может получать команды с программного обеспечения верхнего уровня.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований движения в жидкости по типовым траекториям на основе математической модели движения безвинтового подводного робота. Эксперименты проводились в бассейне размерами 3 x 1.5 x 1.5 метра. При движении робота траектория отслеживалась с помощью системы захвата движения фирмы Contemphas, которая состоит из 4 камер.

Цель экспериментов — определение характера движения безвинтового подводного робота при различных управляющих воздействиях. Рассмотрены три серии экспериментов (по три эксперимента в каждой серии): вращение одной пары больших роторов, вращение одной пары малых роторов и одновременное вращение одной пары больших и одной пары малых роторов. В каждом эксперименте роторы разгонялись до максимальной скорости, которая поддерживалась постоянной в течение 3 секунд.

При вращении пары больших роторов траектории движения робота, полученные в эксперименте и при численном моделировании, представлены на рисунке 4а. При вращении одной пары малых роторов траектории движения робота, полученные в эксперименте и при численном моделировании, представлены на рисунке 4б. При вращении пары больших роторов и одной пары малых роторов траектории движения робота, полученные в эксперименте и при численном моделировании, представлены на рисунке 4в.

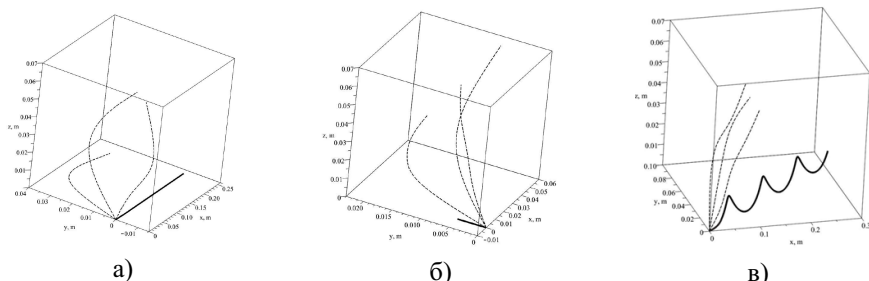


Рисунок 4 — Траектории движения безвинтового подводного робота при
а) $K = (2i_1\omega_{max}, 0, 0)$, б) $K = (0, 2i_2\omega_{max}, 0)$, в) $K = (2i_1\omega_{max}, 0, 0)$

Анализируя отклонения и характер движения безвинтового подводного робота в экспериментах, можно сделать следующие выводы:

1. Управляемое движение безвинтового подводного робота на практике продолжается до тех пор, пока обеспечивается ускоренное вращение роторов. Однако технически максимальная угловая скорость вращения роторов ограничена, и после ее достижения робот продолжает движение по инерции.
2. Движение безвинтового подводного робота сопровождается образованием вихревых структур, что подтверждается данными, полученными с использованием системы визуализации потоков.
3. Математическая модель движения записана в рамках теории идеальной жидкости без учета вязкого сопротивления, что вносит несоответствия между теоретической и наблюдаемой в экспериментах траекториями движения.
4. Подобную схему и алгоритмы управления в качестве практического применения можно использовать для реализации различных маневров (например, разворот на месте) в управлении подводными роботами.
5. Модель качественно описывает движение, но на количественное согласование влияет точность определения большого количества параметров. Движение возможно, однако его эффективность невысока.

Учитывая полученные результаты, для проведения дальнейшего исследования разработана вторая модель водного робота с внутренним ротором со следующими условиями:

1. Использование модели движения, учитывающей вязкое сопротивление жидкости. Для упрощения расчетов рассмотрим плоско-параллельное движение по поверхности жидкости.
2. Использование ассиметричной формы оболочки робота. При движении с образованием вихревых структур необходимо выбрать такую форму оболочки робота, для которой образование вихрей не будет препятствовать движению. Такой формой может быть оболочка с острой кромкой, например, в виде симметричного профиля крыла Жуковского либо симметричного профиля крыла классификации NASA.
3. Использование периодического управления. Движение робота происходит при ускоренном вращении роторов, а чтобы его обеспечить, необходимо периодически изменять направление вращения ротора.

В **пятой главе** описана конструкция безвинтового надводного робота с оболочкой, имеющей форму симметричного профиля с острой кромкой.

Робот представляет собой полый объект, в продольном сечении имеющий форму профиля крыла NASA 0040 (см. рисунок 5а) длиной 340 мм, шириной 134 мм. Высота робота 80 мм.



Рисунок 5 — а) Безвинтовой надводный робот с острой кромкой. б) Кинематическая схема передачи вращения от двигателя к ротору

Внутри оболочки робота закреплен ротор 4 с двигателем 1 таким образом, что центр масс всей системы находится максимально близко к нижней грани робота. Для передачи вращения с двигателя к ротору использовался редуктор 2 и пара шестерен 3. Кинематическая схема передачи вращения от двигателя к ротору представлена на рисунке 5б. Внутри также располагается элемент питания и плата с микроконтроллером, управляющим вращением двигателя постоянного тока.

Для управления безвинтовым надводным роботом с острой кромкой была разработана система управления, структурная схема которой представлена на рисунке 6. На схеме ω_{set} – заданная скорость вращения ротора. Блок регулятора скорости представляет собой ПИД-регулятор, который обеспечивает поддержание значения заданной скорости. На выходе данного блока получаем ШИМ-сигнал необходимой скважности. Коэффициенты ПИД-регулятора подобраны экспериментально. Далее ШИМ-сигнал подается на драйвер двигателя постоянного тока, который его усиливает до необходимого напряжения и подает на обмотки двигателя. На валу двигателя располагается датчик положения вала

(энкодер), с помощью которого измеряется угол поворота вала двигателя φ , с помощью которого можно рассчитать значение $\hat{\omega}_{set}$ – фактическую скорость вращения ротора. Полученное значение $\hat{\omega}_{set}$ учитывается блоком регулятора скорости при расчете управляющих сигналов, идущих на двигатель.

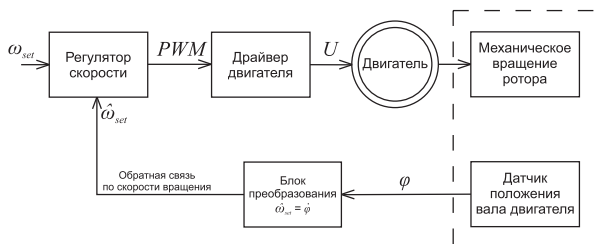


Рисунок 6 – Структурная схема системы управления безвинтового надводного робота с острой кромкой

В шестой главе представлены результаты разработки математической модели движения в жидкости безвинтового надводного робота с острой кромкой.

Для описания движения робота введем две системы координат: неподвижную Oxy и подвижную Cx_1x_2 , жестко связанную с телом (см. рисунок 7), точка C совпадает с центром масс системы. Положение подвижной системы координат относительно неподвижной будем задавать с помощью радиус-вектора $\mathbf{r} = (x, y)$ точки C , а ее ориентацию углом α .

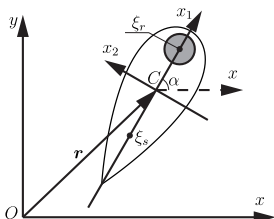


Рисунок 7 – Oxy – неподвижная система координат, Cx_1x_2 – подвижная система координат

Справедливы следующие кинематические соотношения:

$$\dot{x} = v_1 \cos \alpha - v_2 \sin \alpha, \quad \dot{y} = v_1 \sin \alpha + v_2 \cos \alpha, \quad \dot{\alpha} = \omega, \quad (6)$$

где v_1, v_2 – проекции вектора поступательной скорости точки C на подвижные оси, ω – угловая скорость тела.

Для описания движения мы воспользуемся уравнениями Ньютона-Эйлера при дополнительном предположении, что силы и момент сил, действующие на

тело, зависят только от его скоростей и ускорений:

$$\begin{aligned} m\dot{v}_1 &= mv_2\omega + f_1(v_1, v_2, \omega, \dot{v}_1, \dot{v}_2, \dot{\omega}), \quad m\dot{v}_2 = -mv_1\omega + f_2(v_1, v_2, \omega, \dot{v}_1, \dot{v}_2, \dot{\omega}), \\ I\dot{\omega} &= g(v_1, v_2, \omega, \dot{v}_1, \dot{v}_2, \dot{\omega}), \end{aligned} \quad (7)$$

где m , I — масса и момент инерции робота соответственно, f_1 , f_2 — проекции силы реакции жидкости на подвижные оси, связанные с телом, g — момент силы реакции жидкости.

Для определения вида f_1 , f_2 и g воспользуемся уравнениями Кирхгофа, дополненные слагаемыми, описывающими вязкое сопротивление:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial v_1} &= \omega \frac{\partial T}{\partial v_2} - c_1 v_1 |v_1|, \quad \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial v_2} = -\omega \frac{\partial T}{\partial v_1} - c_2 v_2 |v_2|, \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \omega} &= v_2 \frac{\partial T}{\partial v_1} - v_1 \frac{\partial T}{\partial v_2} - c_3 \omega |\omega|, \end{aligned} \quad (8)$$

где c_1, c_2, c_3 — коэффициенты вязкого сопротивления, T — кинетическая энергия системы, состоящая из кинетической энергии оболочки, кинетической энергии жидкости и кинетической энергии ротора.

После подстановки кинетической энергии в уравнение (8), полная система уравнений рассматриваемой системы может быть записана в следующей форме:

$$\begin{aligned} (m + \lambda_{11})\dot{v}_1 &= (m + \lambda_{22})v_2\omega + \lambda_{23}\omega^2 - c_1 v_1 |v_1|, \\ (m + \lambda_{22})\dot{v}_2 + \lambda_{23}\dot{\omega} &= -(m + \lambda_{11})v_1\omega - c_2 v_2 |v_2|, \end{aligned} \quad (9a)$$

$$\lambda_{23}\dot{v}_2 + (I + \lambda_{33})\dot{\omega} = (\lambda_{11} - \lambda_{22})v_1 v_2 - \lambda_{23}v_1\omega - c_3 \omega |\omega| - \dot{k}(t),$$

$$\dot{x} = v_1 \cos \alpha - v_2 \sin \alpha, \quad \dot{y} = v_1 \sin \alpha + v_2 \cos \alpha, \quad \dot{\alpha} = \omega. \quad (9b)$$

где λ_{11} , λ_{22} — присоединенные массы, λ_{33} — присоединенный момент инерции, λ_{23} — коэффициент, возникающий вследствие смещения центра давления относительно центра масс; $\dot{k}(t)$ — гиросtatический момент ротора.

Сравнивая уравнения (9a) с уравнениями Ньютона-Эйлера (7), запишем выражения для сил f_1 , f_2 и момента g :

$$\begin{aligned} f_1 &= -\lambda_{11}\dot{v}_1 + \lambda_{22}v_2\omega + \lambda_{23}\omega^2 - c_1 v_1 |v_1|, \\ f_2 &= -\lambda_{22}\dot{v}_2 - \lambda_{23}\dot{\omega} - \lambda_{11}v_1\omega - c_2 v_2 |v_2|, \\ g &= -\lambda_{23}\dot{v}_2 - \lambda_{33}\dot{\omega} + (\lambda_{11} - \lambda_{22})v_1 v_2 - \lambda_{23}v_1\omega - c_3 \omega |\omega| - \dot{k}(t), \end{aligned} \quad (10)$$

где коэффициенты λ_{ij} и c_i подлежат определению, а $\dot{k}(t)$ является управляющим воздействием. Для определения коэффициентов, входящих в эти выражения, мы воспользуемся подходом, основанным на численном решении уравнений Навье-Стокса, используя экспериментальные данные.

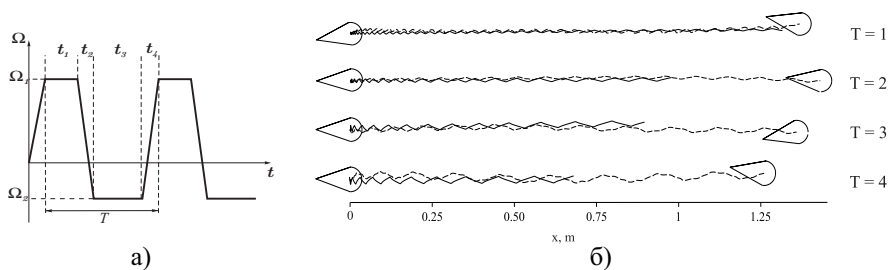


Рисунок 8 — а) График зависимости угловой скорости вращения ротора от времени в общем виде. T — период управляющего воздействия; t_1, t_3 — интервалы времени с постоянными угловыми скоростями вращения ротора Ω_1, Ω_2 соответственно, t_2, t_4 — интервалы равноускоренного вращения ротора. б) Траектории движения робота при $\Omega_1 = \Omega_{max}$, $\Omega_2 = -\Omega_{max}$ и различных управляющих воздействиях. Пунктирной линией обозначены траектории, полученные по результатам численного моделирования, сплошной — экспериментальные траектории.

Анализ разработанной модели позволит сформировать управляющие воздействия. Зададим управление движением ротора $\Omega(t)$ при помощи кусочно-непрерывной периодической функции, представленной на рисунке 8а.

Далее на основании полученных уравнений движения и предложенного закона управляющего воздействия проведены исследования зависимости формы траектории от характера управляющего воздействия и от параметров прототипа робота.

В **седьмой главе** представлены результаты экспериментальных исследований движения в жидкости безвинтового надводного робота с острой кромкой.

Эксперименты проводились в бассейне 2 x 1.2 метра. При движении робота траектория отслеживалась с помощью системы захвата движения.

Движение вдоль прямой. Проведем экспериментальные исследования со следующими параметрами, входящими в закон изменения угловой скорости вращения ротора: $t_1 = t_3, t_2 = t_4 \approx 0.1$ секунды, $\Omega_1 = \Omega_{max}$, $\Omega_2 = -\Omega_{max}$, где Ω_{max} — максимальная угловая скорость вращения ротора для данной модели робота. Таким образом, в качестве изменяемого параметра в экспериментах движения вдоль прямой выступает период T . Проведены эксперименты при $T = 1, 2, 3, 4$ секунды. На рисунке 8б представлены экспериментальные и расчетные траектории движения при различных управляющих воздействиях. Время моделирования и экспериментов для всех тестов составило 40 секунд.

Зависимость скорости движения робота от периода управляющего воздействия в данных исследованиях не очевидна, возможно, из-за ограниченных размеров бассейна. Наилучшее количественное согласование результатов моделирования с экспериментом получено при $T = 1$ с. Именно по этим экспериментальным данным проводилось вычисление коэффициентов модели.

При смещении угловой скорости на величину Ω_0 (см. рис. 9а) и сохранении равенств интервалов $t_1 = t_3, t_2 = t_4$ робот также движется вдоль прямой.

Соотношение угловых скоростей оставалось постоянным $\Omega_1 - \Omega_2 = const.$ На рис. 9б приведены соответствующие траектории движения робота, из которых видно, что робот двигался в среднем прямолинейно, но в различных направлениях. Причем изменение направления происходит в начале движения, а угол поворота зависит от сдвига управления Ω_0 .

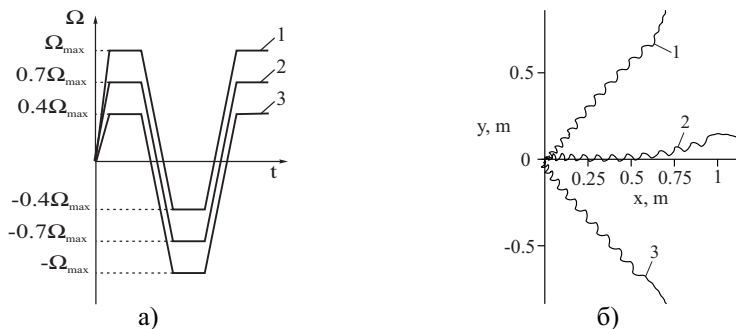


Рисунок 9 – Несимметричные управляющие воздействия при $\Omega_1 - \Omega_2 = const, t_2 = t_4 = 0.1, t_1 = t_3 = 0.9, T = 2$ (а) и соответствующие им траектории движения водного робота (б).

Движение вдоль окружности. Движение робота по траектории по форме, близкой к окружности, оказывается возможным, если в управляющее воздействие внести асимметрию на периоде. Асимметрия достигается при $t_1 \neq t_3$ и $t_2 = t_4$. То есть длительности вращения ротора в направлениях по часовой стрелке и против часовой стрелки различны. Типовая траектория движения робота при $t_3 = 10t_1, \Omega_1 = \Omega_{max}, \Omega_2 = -\Omega_{max}, t_2 = t_4 = 0.1$ с, $T = 3$ с и результаты моделирования приведены на рис. 10а. На рис. 10б приведена графическая зависимость радиуса окружности, аппроксимирующей траекторию, от соотношения длительностей рассматриваемых интервалов $k_1 = t_3/t_1$.

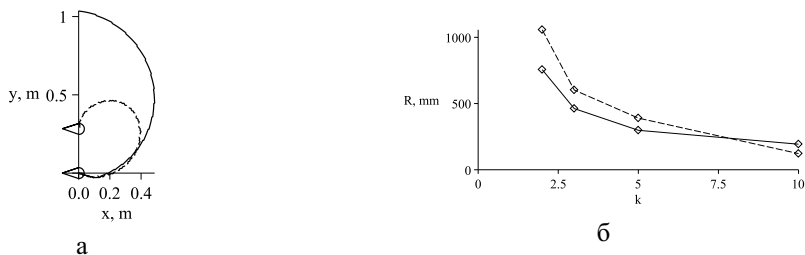
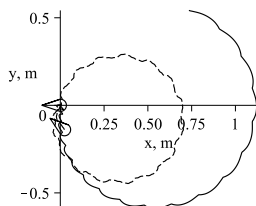


Рисунок 10 – а) Траектория движения робота по окружности при эксперименте (штриховая линия) и моделировании (сплошная линия) б)

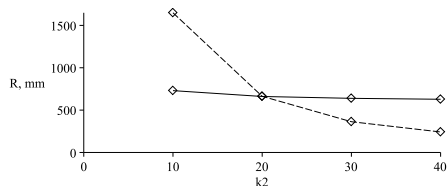
Зависимость радиуса траектории движения робота от $k_1 = \frac{t_3}{t_1}$ при эксперименте (штриховая линия) и моделировании (сплошная линия), построенная по экспериментам при $k_1 = 2, 3, 5, 10$

Из рис. 10б видно, что теоретическая и экспериментальная зависимости качественно согласуются.

Вторым способом достижения асимметрии является форма управляющего воздействия при $t_1 = t_3$ и $t_2 \neq t_4$. На рис. 11а представлены экспериментальная и расчетная траектории движения робота при данном управляющем воздействии для следующих значений: $T = 5, t_4 = 0.1, t_2 = 3, \Omega_1 = \Omega_{max}, \Omega_2 = -\Omega_{max}$. На рис. 11б приведены экспериментальная и расчетная зависимости радиуса траектории движения робота от коэффициента $k_2 = t_2/t_4$.



а

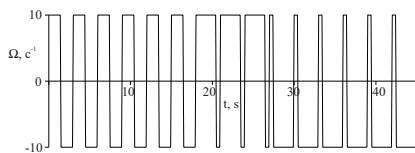


б

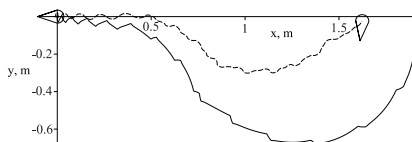
Рисунок 11 — а) Траектория движения робота вдоль окружности при $T = 5, t_1 = t_3 = 0.95, t_2 = 3, t_4 = 0.1, \omega_1 = \omega_{max}, \omega_2 = -\omega_{max}$ в эксперименте (штриховая линия) и моделировании (сплошная линия), б) Зависимость радиуса траектории движения робота от $k_2 = \frac{t_2}{t_4}$ при эксперименте (штриховая линия) и моделировании (сплошная линия)

Из рис. 11б видно, что радиус траекторий, полученных при моделировании, незначительно уменьшается при увеличении k_1 . Для траекторий, полученных в эксперименте, при увеличении k_2 в 4 раза радиус траектории уменьшается более чем в 6 раз.

При комбинировании рассматриваемых управлений, обеспечивающих движение вдоль прямой и окружности, можно реализовать движение вдоль сложных траекторий. На рисунке 12 приведен пример управляющего воздействия и траектории, полученные в эксперименте и моделировании.



а



б

Рисунок 12 — Управления для реализации сложного движения (а) и соответствующая траектория движения (б) при эксперименте (штриховая линия) и моделировании (сплошная линия)

Выделим основные результаты экспериментальных исследований:

- Рассматриваемая теоретическая модель управляемого движения безвинтового робота качественно правильно описывает его движение вдоль прямой и окружности.
- Сдвиг управляющего воздействия $\omega(t) \rightarrow \omega_0 + \omega(t)$ не влияет на форму траектории. На размер и форму траектории движения влияет асимметрия управляющего воздействия на его периоде.
- Количественного согласования результатов моделирования и экспериментов можно достичь для конкретных тестов, проводя перерасчет коэффициентов под конкретные экспериментальные данные.
- Комбинируя описанные маневры, можно двигаться по сложной траектории.

Полученные результаты подтверждают возможность теоретической модели качественно описать движение безвинтового робота, а также возможность формирования управления вдоль сложных криволинейных траектории, разбивая их на характерные участки, для которых можно сформировать базовые управления – гейты. Одним из способов повышения точности совпадения количественных результатов численного моделирования и результатов экспериментов является уточнение коэффициентов модели для различных гейтов.

В заключении приведены основные результаты работы:

1. Разработана математическая модель движения безвинтового подводного робота в форме эллипсоида в жидкости за счет внутреннего гиросtatического момента в рамках теории идеальной жидкости. Исследования управляемости модели показали, что для полной управляемости форму робота необходимо сделать винтовой.
2. Разработаны конструкция и экспериментальный образец безвинтового подводного робота в форме эллипсоида. Учтено требование в необходимости винтовой формы робота, к оболочке в виде эллипсоида вращения добавлены винтовые лопасти. Проработана конструкция внутренних компонентов с учетом ограничений в размерах. Разработана система управления роботом.
3. Проведены экспериментальные исследования безвинтового подводного робота в форме эллипсоида, проанализированы результаты. Для более точного описания движения необходимо учитывать в модели вязкое сопротивление, генерацию вихревых структур. В рамках дальнейшего исследования рассматривается движение объекта в форме симметричного профиля NASA 0040 по поверхности жидкости.
4. Разработана математическая модель движения безвинтового надводного робота с оболочкой, имеющей форму симметричного профиля NASA 0040 и острую кромку, в жидкости за счет внутреннего гиросtatического момента с учетом вязкого сопротивления. На основе анализа математической модели разработан алгоритм управления роботом, определена форма управляющего воздействия для движения вдоль прямой и вдоль окружности.

5. Разработаны конструкция и экспериментальный образец безвинтового надводного робота с острой кромкой. Разработана система управления роботом.
6. Проведены экспериментальные исследования с безвинтовым надводным роботом с острой кромкой, проанализированы результаты. Показано, что разработанная математическая модель качественно описывает движение робота. Рассмотрены движения вдоль прямой и вдоль окружности при различных управляющих воздействиях.
7. По разработанной конструкции получен патент на полезную модель безвинтового подводного робота в форме эллипсоида, для разработанных программных продуктов получены свидетельства о регистрации программ ЭВМ.

Публикации автора по теме диссертации В изданиях из списка ВАК

1. Ветчанин Е. В, Караваев Ю.Л., Калинин А.А., Пивоварова Е.Н., **Клековкин А.В.** Модель безвинтового подводного робота //Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. – 2015. – Т. 25. – № 4. – С. 544–553.

В изданиях, входящих в базу цитирования Web of Science

2. Karavaev Y. L., Kilin A. A., **Klekovkin A. V.** Experimental investigations of the controlled motion of a screwless underwater robot // Regular and Chaotic Dynamics. – 2016. – Т. 21. – №. 7-8. – С. 918–926
3. **А. В. Клековкин.** Моделирование движения безвинтового мобильного робота с неизменяемой формой оболочки управляемого с помощью вращения внутреннего ротора // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. – 2020. – Т. 30. – № 4. С. 651–663. Принята к публикации.

Патенты РФ

4. Патент на полезную модель. №172254 РФ. Безвинтовой подводный робот // А.В. Борисов, И.С. Мамаев, А.А. Килин, А.А. Калинин, Ю.Л. Караваев, **А.В. Клековкин**, Е.В. Ветчанин. Заявка: 2016144812, 15.11.2016, опубл. 3.07.2017
5. № 2017613219. Программа для управления безвинтовым подводным роботом // А.В. Борисов, И.С. Мамаев, А.А. Килин, Ю.Л. Караваев, **А.В. Клековкин**. Заявка: 2016662663, 22.11.2016, опубл. 16.03.2017
6. № 2019612284. Программа управления безвинтовым надводным роботом с внутренним ротором // А.В. Борисов, И.С. Мамаев, А.А. Килин, **А.В. Клековкин**, Ю.Л. Караваев. Заявка: 2019610925, 04.02.2019, опубл. 14.02.2019

Клековкин Антон Владимирович

Исследование динамики безвинтовых роботов в жидкости с неизменяемой формой
оболочки и управляемых внутренними роторами

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. тех. наук

Подписано в печать _____._____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____