

На правах рукописи

**Клековкин Антон Владимирович**

**Динамика и управление недеформируемыми безвинтовыми  
водными роботами**

Специальность 05.02.05 —  
«Роботы, мехатроника и робототехнические системы»

**Автореферат**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Ижевск — 2020

Работа выполнена в Ижевском государственном техническом университете имени М.Т. Калашникова.

Научный руководитель: **Мамаев Иван Сергеевич**  
доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры "Мехатронные системы" ФГБОУ ВО "Ижевского государственного технического университета имени М.Т. Калашникова"

Официальные оппоненты: **Яцун Сергей Федорович**,  
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой "Механика, мехатроника и робототехника",  
ФГБОУ ВО "Юго-западного государственного университета"

**Фамилия Имя Отчество**,  
кандидат физико-математических наук, доцент кафедры "Теоретическая механика",  
ФГБОУ ВО "Волгоградского государственного технического университета"

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

Защита состоится **DD mmmmmmmm YYYY г. в XX часов** на заседании диссертационного совета Д212.028.11 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 Д212.028.11.

Автореферат разослан **DD mmmmmmmm YYYY года**.  
Телефон для справок: +7 (8442) 230-076.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д212.028.11,  
к.т.н, доцент

Калинин Ярослав Владимирович

## 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 относятся водные роботы, передвигающихся посредством имитирования движения живых существ или благодаря наличию внутренних подвижных механизмов, обеспечивающих изменению положения центра масс или кинетического момента. Основными преимуществами данных роботов, перемещающихся в жидкости, является отсутствие внешних подвижных элементов, простота конструкции, а также потенциальная маневренность. Однако, динамика движения подобных систем, является сложной, а процесс формирования управления для реализации движения вдоль даже простых траекторий не всегда очевиден. В связи с этим, проведение теоретических и экспериментальных исследований водных роботов, использующих внутренние механизмы для продвижения в жидкости, является актуальным.

На данный момент для роботов перемещающихся в жидкости самым распространенным способом перемещения является движение за счет вращения гребных винтов, однако отдельный интерес представляет исследование динамики роботов, имитирующих способы перемещения живых существ и движущихся за счет внутренних механизмов. Создание подобных транспортных средств невозможно без проведения базовых исследований их динамических свойств и создания соответствующей теории управления. В связи с этим актуальным является проведение как теоретических, так и экспериментальных работ по созданию высокоманевренных мобильных управляемых систем, реализующих новые методы передвижения в жидкости.

Недеформируемые безвинтовые подводные и надводные роботы реализуют нетрадиционный способ передвижения в жидкости, при котором форма оболочки робота остается неизменной и отсутствуют приводные элементы, взаимодействующие 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.

В настоящее время водные мобильные системы (основанные на традиционном способе перемещении с помощью винтов) широко используются для мониторинга и проведения различных операций в сложных условиях эксплуатации. В частности, для мониторинга подводного рельефа и подводной геологоразведки, мониторинга обшивок подводных конструкций, проведение ремонтных работ на больших глубинах, в условиях химического или радиационного загрязнения и т.д. Использование в аналогичных приложениях

безвинтовых транспортных средств имеет ряд конструкционных и эксплуатационных особенностей: изолированность рабочих узлов от жидкости, простота конструкции, повышенная экологичность.

Одни из первых теоретических исследований в данной области представлены в работах В. В. Козлова, С. М. Рамоданова, Д. А. Онищенко. Была показана возможность неограниченного продвижения тела в рамках модели идеальной жидкости при анизотропии присоединенных масс. В работах Ф. Л. Черноушко, 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. 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.

В работах А. А. Килина и А. И. Кленова рассмотрена локомоционная мобильная платформа, перемещающаяся по поверхности жидкости за счет изменения распределения масс. Разработана математическая модель плоскопараллельного движения в рамках модели идеальной жидкости и математическая модель движения с учетом внешних сил, действующих на объект со стороны жидкости. Изготовлен натурный образец и проведены экспериментальные исследования.

В данной работе проведены исследования с двумя объектами: безвинтовой подводный робот с внутренними роторами в форме эллипсоида и недеформируемый водный робот с острой кромкой. Оба объекта передвигаются за счет изменения гиросtatического момента, возникающего за счет вращения роторов, расположенных внутри оболочки роботов.

Безвинтовой подводный робот с внутренними роторами может двигаться как при частичном так и полном погружении. Для описания его движения разработана трехмерная математическая модель в рамках теории идеальной жидкости. На основе этой модели подобраны режимы управления роторами для различного движения. Проведены экспериментальные исследования.

Недеформируемый водный робот с острой кромкой движется по поверхности жидкости. Разработана математическая модель описывающая плоскопараллельное движение робота, учитывающая сопротивление жидкости. На основе этой модели сформированы режимы управления роторами для различных типов движения. Проведены экспериментальные исследования.

**Целью** данной работы является исследование динамики механизмов, обеспечивающих движение водных роботов за счет изменения гиростатического момента, возникающего при вращении роторов, расположенных внутри роботов.

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

1. Построение математической модели движения безвинтового подводного робота в форме эллипсоида в жидкости за счет изменения внутреннего гиростатического момента.
2. Построение математической модели движения недеформируемого водного робота с острой кромкой по поверхности жидкости при частичном погружении за счет изменения внутреннего гиростатического момента с учетом вязкого сопротивления жидкости.
3. Разработка алгоритма управления движением безвинтового подводного робота в форме эллипсоида в жидкости.
4. Разработка алгоритма управления движением недеформируемого водного робота с острой кромкой по поверхности жидкости при частичном погружении.
5. Анализ и синтез механизмов, обеспечивающих изменение внутреннего гиростатического момента и создание прототипов водных роботов: безвинтового подводного робота в форме эллипсоида и недеформируемого водного робота с острой кромкой; разработка систем управления.
6. Проведение натурных экспериментов и исследования влияния режимов работы механизма на динамику роботов: безвинтового подводного робота в форме эллипсоида и недеформируемого водного робота с острой кромкой.
7. Сравнение экспериментальных данных с результатами численного моделирования для безвинтового подводного робота в форме эллипсоида и недеформируемого водного робота с острой кромкой.

**Научная новизна:**

1. Разработана математическая модель движения безвинтового подводного робота в форме эллипсоида в жидкости за счет изменения внутреннего гиростатического момента.
2. Разработана математическая модель движения недеформируемого водного робота с острой кромкой по поверхности жидкости при частичном погружении за счет изменения внутреннего гиростатического момента с учетом вязкого сопротивления жидкости.
3. Разработан алгоритм управления недеформируемым водным роботом с острой кромкой в жидкости за счет изменения внутреннего гиростатического момента.
4. Разработаны конструкции мобильных водных роботов, перемещающихся за счет изменения внутреннего гиростатического момента:

безвинтового подводного робота в форме эллипсоида и недеформируемого водного робота с острой кромкой.

5. Получены результаты экспериментальных исследований, на основе которых сделана оценка возможности использования разработанных математических моделей движения и алгоритмов управления для безвинтового подводного робота в форме эллипсоида и недеформируемого водного робота с острой кромкой.

**Практическая значимость.** Результаты, изложенные в диссертации, могут быть использованы для проектирования (усовершенствования) водных мобильных аппаратов. Разработанные математические модели движения могут использоваться для определения оптимальных параметров механизмов подобных роботов, перемещающихся в жидкости. Также разработанные математические модели позволяют определить управляющие воздействия для элементарных маневров, которые можно использовать при перемещении роботов подобной конструкции в жидкости.

Безвинтовые плавающие роботы с вращающимися внутренними роторами являются примером сложных динамических систем, на основе которых можно проводить как моделирование, так и экспериментальные исследования, дополняя или упрощая существующие конструкции, что делает их наглядным лабораторным комплексом, который можно внедрять в учебный процесс.

**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 недеформируемого рыбоподобного робота использовался метод обработки данных, полученных с помощью численного решения уравнений Навье-Стокса. При проведении экспериментальных исследований движения роботов использовалась система захвата движения фирмы Vison: для отслеживания движения подводного робота использовалась система, состоящая из 4 камер, предназначенная для работы под водой; для отслеживания движения на поверхности жидкости использовалась система, состоящая из 7 камер. Обработка результатов экспериментов проводилась с использованием программных комплексов Matlab, Maple. Программное обеспечение для управления роботами разрабатывалось на языке Си для микроконтроллера STM32F303K8 и микроконтроллера LPC1768 с ядром Cortex-M4 в среде Keil uVision 5.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Математическая модель движения безвинтового подводного робота в форме эллипсоида в жидкости за счет изменения внутреннего гироэстатического момента.

2. Математическая модель движения недеформируемого водного робота с острой кромкой по поверхности жидкости при частичном погружении за счет изменения внутреннего гидростатического момента с учетом вязкого сопротивления среды.
3. Алгоритм управления недеформируемым водным роботом с острой кромкой по поверхности жидкости при частичном погружении за счет изменения внутреннего гидростатического момента.
4. Конструкции роботов, реализующих движение в жидкости за счет изменения внутреннего гидростатического момента: безвинтового подводного робота в форме эллипсоида и недеформируемого водного робота с острой кромкой.
5. Результаты экспериментальных исследований по оценке разработанных алгоритмов управления для безвинтового подводного робота в форме эллипсоида и недеформируемого водного робота с острой кромкой.

**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, прошедшие поверку.

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

Кроме того, результаты исследований, изложенные в диссертации, докладывались на российских и международных конференциях:

- IV Всероссийская научно-техническая конференция аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием «Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке». (Ижевск, 2016).

- Шестая международная конференция «Geometry, Dynamics, Integrable Systems – GDIS 2016» (Ижевск, 2016 г.)
- Машиноведение и инновации. Конференция молодых учёных и студентов (МИКМУС-2018) (Москва, 2018 г.)
- International Conference "Scientific Heritage of Sergey A. Chaplygin: nonholonomic mechanics, vortex structures and hydrodynamics"(Чебоксары, 2019 г.)
- 30-я международная научно-техническая конференция "Экстремальная робототехника-2019"(Санкт-Петербург, 2019 г.)
- 23rd issue of the International Conference Series on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines — 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 12 публикациях, 3 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, из них 2 публикации изданы в научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus. Одна публикация издана в сборниках докладов конференций, индексируемых Scopus, 5 — 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 **132** страницы текста с **79** рисунками и 12 таблицами. Список литературы содержит **87** наименований.

## Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, 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. Это перемещение за счет гребных винтов, перемещение за счет изменения формы тела, перемещение за счет использования реактивного привода и перемещение 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. На данный момент движение за счет внутренних механизмов является малоизученным, но при этом существуют задачи, в которых роботы, использующие этот способ перемещения, могут иметь преимущество перед роботами, использующими другие способы перемещения в жидкости.

**Во второй главе** представлена математическая модель трехмерного движения безвинтового подводного робота с внутренними роторами в жидкости. Математическая модель основана на исследованиях В.В. Козлова и С.М. Рамоданова<sup>1,2</sup> и подразумевает собой движение твердого тела в идеальной жидкости в трехмерной постановке. Безвинтовой подводный робот рассматривается в виде системы, состоящей из жесткой внешней оболочки, имеющей форму эллипсоида вращения, и трех внутренних роторов (рисунок 1).

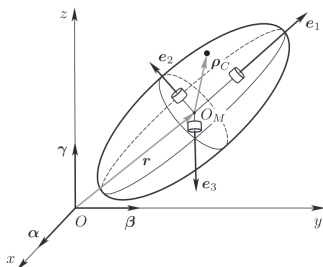


Рис. 1 — Схематическая модель безвинтового подводного робота с внутренними роторами, где  $Oxyz$  — неподвижная система координат,  $O_M e_1 e_2 e_3$  — подвижная система координат,  $O_M$  — геометрический центр эллипсоида,  $\mathbf{r} = (x, y, z)$  — радиус-вектор объекта,  $\rho_C$  — вектор центра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

Уравнения движения рассматриваемой системы в виде классических уравнений Кирхгофа имеют вид

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

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.

<sup>1</sup>Козлов, В. В. О движении изменяемого тела в идеальной жидкости / В. В. Козлов, С. М. Рамоданов // ПММ. 2001. т. 65. Вер. 4. с. 592–601.

<sup>2</sup>Козлов, В. В. О движении в идеальной жидкости тела с жесткой оболочкой и меняющейся геометрией масс / В. В. Козлов, С. М. Рамоданов // ДАН. 2002. т. 382. Вер. 4. с. 478–481.

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

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

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

После подстановки кинетической энергии в уравнения Кирхгоффа уравнения движения принимают вид

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

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 гиостатического момента.

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

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

где  $\mathbf{P} = \frac{\partial T}{\partial \mathbf{V}}$  и  $\mathbf{M} = \frac{\partial T}{\partial \Omega}$  имеют гидродинамический смысл и называются, соответственно, импульсивным моментом и импульсивной силой<sup>3</sup>.

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<sup>4</sup>:

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

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

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

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

<sup>3</sup>Борисов, А. В. Динамика твердого тела / А. В. Борисов, И. С. Мамаев. М. – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2005. 576 с.

<sup>4</sup>Козлов, В. В. О движении изменяемого тела в идеальной жидкости / В. В. Козлов, С. М. Рамоданов // ПММ. 2001. т. 65. Вер. 4. с. 592–601.

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, используя теорему Рашевского-Чжоу<sup>5</sup>, полученная система исследована на управляемость. 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 используя полученную модель движения произведено моделирование траекторий движения при вращении роторов с постоянной скоростью.

**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 дискообразной перегородки – платформы 2. К оболочке крепятся лопасти 3. Размер эллипсоида по большей оси составляет 300 мм, по меньшей – 200 мм.

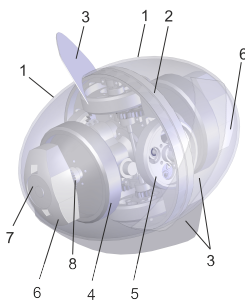


Рис. 2 — Конструкция и корпусные элементы экспериментальной модели безвинтового подводного робота

Внутри корпуса робота установлены три пары роторов таким образом, что оси роторов расположены под углом  $90^\circ$  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

<sup>5</sup>Рашевский, П. О соединимости любых двух точек вполне неголомомного пространства допустимой линией / П. Рашевский // Учен. зап. Пед. ин-та им. Либкнехта, сер. физ.-матем. 1938. т. 3, № 2. с. 83—94.

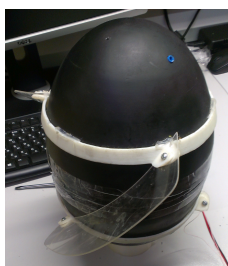
робота включает пару роторов большего размера 4, и две пары роторов меньшего размера 5. Оси малых роторов выполнены отдельно для каждого маховика и установлены соосно на некотором расстоянии друг от друга. Малые роторы соединены кинематически попарно с помощью промежуточных (дополнительных) осей и зубчатых пар таким образом, что их вращение происходит также, как если бы они были на одной общей оси.

Для погружения робот оснащен механизмом регулировки плавучести. Он состоит из двух одинаковых модулей плавучести 6, размещенных внутри оболочки в наиболее удаленных частях. Модули плавучести имеют в своем составе поворотный пневмоцилиндр 7 с приводом 8 на основе электродвигателя с редуктором. Полости пневмоцилиндра — воздушная и жидкостная имеют каналы, соединяющие их соответственно с внутренней полостью и внешней средой.

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 —  $45^\circ$ . Фотографии робота в сборе и без половины оболочки представлены на рисунке 3.



а)



б)

Рис. 3 — Фотографии безвинтового подводного робота

Центральным элементом системы управления является микроконтроллер LPC1768FBD100 фирмы NXP. Данный микроконтроллер имеет ядро ARM Cortex-M3, работает на частоте до 100 МГц и содержит большой набор различной периферии. Микроконтроллер 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 безвинтового подводного робота в форме эллипсоида в жидкости по типовым траекториям на основе математической модели движения. 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, расположенных по периметру области съемки. Камеры предназначены для работы под водой.

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.

**Вращение пары больших роторов.** Положение робота в начальный момент времени и момент времени  $t = 3$  секунды после начала движения, для отдельного эксперимента представлено на рисунках 4а и 4б.

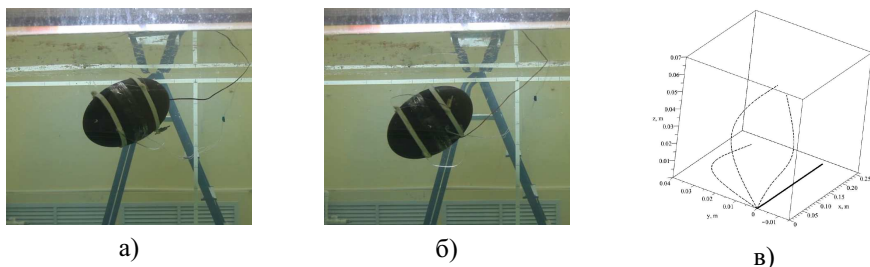


Рис. 4 — Положение робота а) в начальный момент времени и б) момент времени  $t=3$  секунды от начала движения; в) Теоретическая (сплошная линия) и экспериментальные (штриховые линии) траектории движения безвинтового подводного робота при  $K = (2i_1\omega_{max}, 0, 0)$

Траектории движения робота полученные в эксперименте и при численном моделировании представлены на рисунке 4в. Среднее значение перемещения при моделировании:  $|\mathbf{r}_t| = 0.275$  м. Среднее значение перемещения в эксперименте:  $|\mathbf{r}_{exp}| = 0.128$  м. Среднее значение перемещения рассчитывалось по формуле:  $|\mathbf{r}| = \sqrt{(x_{st} - x_{fin})^2 + (y_{st} - y_{fin})^2 + (z_{st} - z_{fin})^2}$ , где  $x_{st}, y_{st}, z_{st}$  — координаты робота в момент начала движения в неподвижной системе координат,  $x_{fin}, y_{fin}, z_{fin}$  — координаты робота в момент окончания движения в неподвижной системе координат.

**Вращение одной пары малых роторов.** Положение робота в начальный момент времени и момент времени  $t = 3$  секунды после начала движения, для отдельного эксперимента представлено на рисунках 5а и 5б.

Траектории движения робота полученные в эксперименте и при численном моделировании представлены на рисунке 5в. Среднее значение перемещения при моделировании:  $|\mathbf{r}_t| = 0.005$  м. Среднее значение перемещения в эксперименте:  $|\mathbf{r}_{exp}| = 0.087$  м.

**Вращение пары больших роторов и одной пары малых роторов.** Положение робота в начальный момент времени и момент времени  $t = 3$  секунды после начала движения, для отдельного эксперимента представлено на рисунках 6а и 6б.

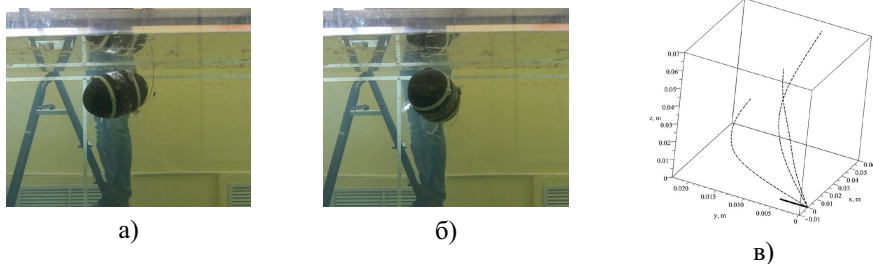


Рис. 5 — Положение робота а) в начальный момент времени и б) момент времени  $t=3$  секунды от начала движения; в) Теоретическая (сплошная линия) и экспериментальные (штриховые линии) траектории движения безвинтового подводного робота при  $\mathbf{K} = (0, 2i_2\omega_{max}, 0)$

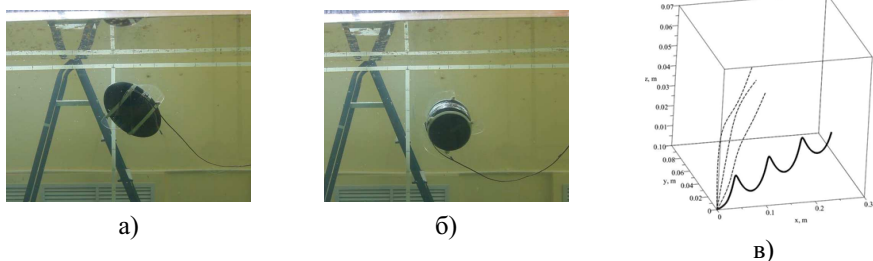


Рис. 6 — Положение робота а) в начальный момент времени и б) момент времени  $t=3$  секунды от начала движения; в) Теоретическая (сплошная линия) и экспериментальные (штриховые линии) траектории движения безвинтового подводного робота при  $\mathbf{K} = (2i_1\omega_{max}, 0, 0)$

Траектории движения робота полученные в эксперименте и при численном моделировании представлены на рисунке 6в. Среднее значение перемещения при моделировании:  $|\mathbf{r}_t| = 0.275$  м. Среднее значение перемещения в эксперименте:  $|\mathbf{r}_{exp}| = 0.189$  м.

Отметим, что в первых двух случаях управляющих воздействий в рамках теоретической модели робот движется прямолинейно не изменяя своей ориентации. При проведении экспериментов такого движения добиться не удастся.

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. Чем больше ускорение роторов, тем быстрее движется робот. 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 так же вносит несоответствия между теоретической и наблюдаемой в экспериментах траекториях 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. Использовать модель движения, учитывающую вязкое сопротивление жидкости. Для упрощения расчетов рассмотрим плоско-параллельное движение по поверхности жидкости.
2. Использовать ассиметричную форму 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 НАСА.
3. Использовать периодическое управление. Движение робота происходит при ускоренном вращении роторов, а чтобы его обеспечить необходимо периодически изменять направление вращения ротора.

В пятой главе описана конструкция недеформируемого водного робота с острой кромкой.

Робот представляет собой полый объект, в продольном сечении имеющий форму профиля крыла NACA 0040 (см. рисунок 7а) длиной 340 мм, шириной 134 мм. Высота робота 80 мм.

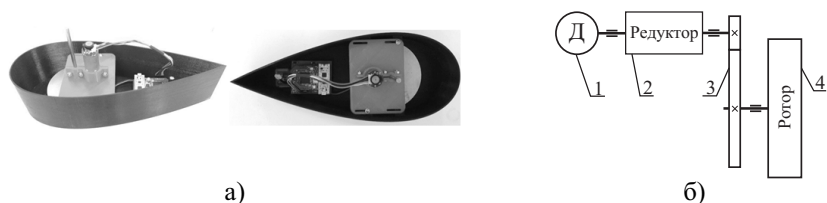


Рис. 7 — а) Недеформируемый водный робот с острой кромкой. б) Кинематическая схема передачи вращения от двигателя к ротору

Корпус изготовлен на 3Д-принтере из PLA-пластика с толщиной стенки в 2 мм. Внутри корпуса 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 76. Внутри так же располагается элемент питания и плата с микроконтроллером модели STM32F303K8T6, управляющим вращением двигателем постоянного тока.

Для управления недеформируемым водным роботом с острой кромкой была разработана система управления, структурная схема которой представлена на рисунке 8.

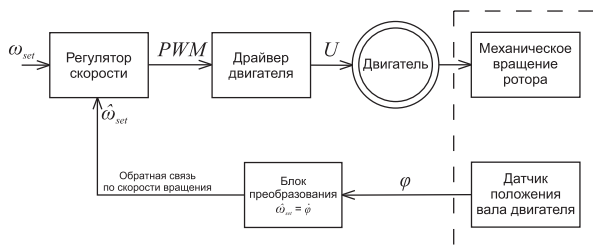


Рис. 8 — Структурная схема системы управления недеформируемого водного робота с острой кромкой

На схеме  $\omega_{set}$  — заданная скорость вращения ротора. Блок регулятора скорости представляет собой ПИД-регулятор, который обеспечивает поддержание значения заданной скорости  $\omega_{set}$ . 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 (инкрементальный энкодер с 48 импульсами на оборот), с помощью которого измеряется угол поворота вала двигателя  $\varphi$ . Далее с помощью блока расчета угловой скорости ротора получаем значение  $\dot{\omega}_{set}$  — фактическую скорость вращения ротора. Полученное значение  $\dot{\omega}_{set}$  учитывается блоком регулятора скорости при расчете управляющих сигналов, идущих на двигатель.

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

Для описания движения робота введем две системы координат: неподвижную  $Oxy$  и подвижную  $Cx_1x_2$  жестко связанную с телом (см. рисунок 9), 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  $\alpha$ .



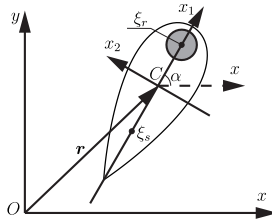


Рис. 9 —  $Oxy$  — неподвижная система координат,  $Cx_1x_2$  — подвижная система координат

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,  $\omega$  — 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:

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

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:

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

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:

$$\begin{aligned} (m + \lambda_{11})\dot{v}_1 &= (m + \lambda_{22})v_2\omega + \lambda_{23}\omega^2 - c_1 v_1 |v_1|, \\ (m + \lambda_{22})\dot{v}_2 + \lambda_{23}\dot{\omega} &= -(m + \lambda_{11})v_1\omega - c_2 v_2 |v_2|, \\ \lambda_{23}\dot{v}_2 + (I + \lambda_{33})\dot{\omega} &= (\lambda_{11} - \lambda_{22})v_1 v_2 - \lambda_{23}v_1\omega - c_3 \omega |\omega| - \dot{k}(t), \end{aligned} \quad (9a)$$

$$\dot{x} = v_1 \cos \alpha - v_2 \sin \alpha, \quad \dot{y} = v_1 \sin \alpha + v_2 \cos \alpha, \quad \dot{\alpha} = \omega. \quad (96)$$

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

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

$$\begin{aligned} f_1 &= -\lambda_{11}\dot{v}_1 + \lambda_{22}v_2\omega + \lambda_{23}\omega^2 - c_1v_1|v_1|, \\ f_2 &= -\lambda_{22}\dot{v}_2 - \lambda_{23}\dot{\omega} - \lambda_{11}v_1\omega - c_2v_2|v_2|, \\ g &= -\lambda_{23}\dot{v}_2 - \lambda_{33}\dot{\omega} + (\lambda_{11} - \lambda_{22})v_1v_2 - \lambda_{23}v_1\omega - c_3\omega|\omega| - \dot{k}(t), \end{aligned} \quad (10)$$

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

Анализ разработанной модели позволит сформировать управляющие воздействия. Зададим управление движением ротора  $\Omega(t)$  при помощи кусочно-непрерывной периодической функции представленной на рисунке 10а.

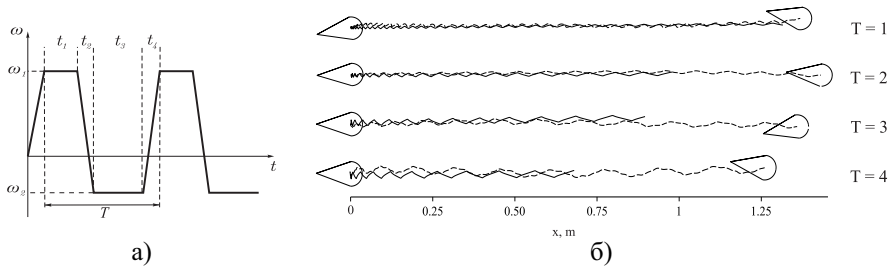


Рис. 10 — а) График зависимости угловой скорости вращения ротора от времени в общем виде.  $T$  — период управляющего воздействия;  $t_1, t_3$  — задают интервалы времени с постоянными угловыми скоростями вращения ротора  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  соответственно,  $t_2, t_4$  — интервалы равноускоренного 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.

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 недеформируемого водного робота с острой кромкой в жидкости.

Эксперименты проводились в бассейне размерами 2 x 1.2 метра. При движении робота траектория отслеживалась с помощью системы захвата движения Visop, которая состоит из 7 камер, расположенных по периметру бассейна.

**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  $\omega_{max}$  – 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 10б 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  $\omega_0$  (см. рис. 11а), 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. 11б приведены соответствующие траектории движения робота, из которых видно, что робот двигался в среднем прямолинейно, но в различных направлениях. При этом изменение направления происходит в начале движения, а угол поворота зависит от сдвига управления  $\omega_0$ .

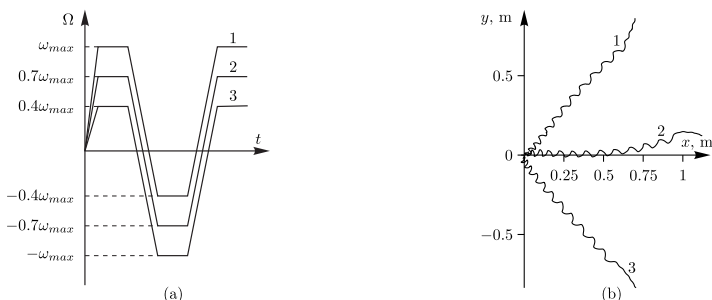
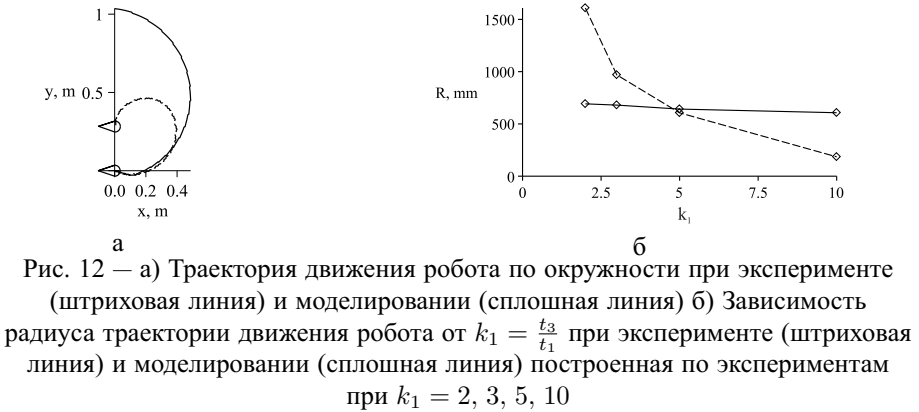


Рис. 11 – Несимметричные управляющие воздействия при  $\omega_1 - \omega_2 = const$ ,  $t_2 = t_4 = 0.1, t_1 = t_3 = 0.9, T = 2$  (а) и соответствующие им траектории движения водного робота (б).

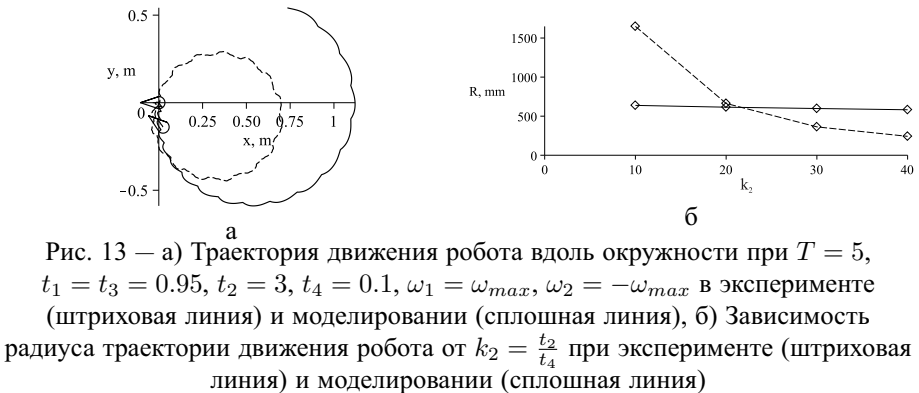
**Движение вдоль окружности.** Движение робота по траектории по форме близкой к окружности оказывается возможным, если в управляющем воздействии  $t_1 \neq t_3$  и  $t_2 = t_4$ . То есть длительности вращения ротора в направлениях по часовой стрелке и против часовой стрелки различны. Типовая траектория 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. 12а. На рис. 12б приведена графическая зависимость радиуса окружности, аппроксимирующей траекторию, от соотношения длительностей рассматриваемых интервалов  $k_1 = t_3/t_1$ .



Из рис. 12б видно, что радиус траекторий, полученных при моделировании, незначительно уменьшается при увеличении  $k_1$ . Для траекторий, полученных в эксперименте, при увеличении  $k_1$  в 4 раза, радиус траектории уменьшается более чем в 6 раз.

Движения водного робота вдоль окружности так же можно добиться при  $t_1 = t_3$  и  $t_2 \neq t_4$ . На рис. 13а 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. 13б приведены экспериментальная и расчетная зависимости радиуса траектории движения робота от коэффициента  $k_2 = t_2/t_4$ .



При комбинировании рассматриваемых управлений, обеспечивающих движение вдоль прямой и окружности, можно реализовать движение вдоль

сложных траекторий. На рис. 14а приведен пример управляющего воздействия с тремя характерными управлениями: движение вдоль прямой, поворот направо, поворот налево. Траектории полученные в эксперименте и моделировании приведены на рис. 14б.

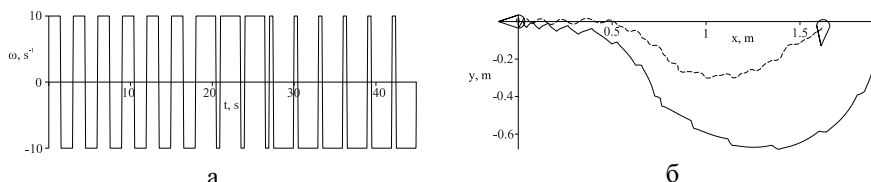


Рис. 14 — Управления для реализации сложного движения (а) и соответствующая траектория движения (б) при эксперименте (штриховая линия) и моделировании (сплошная линия)

Выделим основные результаты экспериментальных исследований:

- Рассматриваемая теоретическая модель управляемого движения водного 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 также подтверждают возможность теоретической модели качественно описать движение водного 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 **заклучении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

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 недеформируемого водного робота с острой кромкой 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 недеформируемого водного робота с острой кромкой. Разработана система управления роботом.
6. Проведены экспериментальные исследования недеформируемого водного робота 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 разработанным конструкциям получен патент на полезную модель безвинтового подводного робота с внутренними роторами, для разработанных программных продуктов получены свидетельства о регистрации программ ЭВМ.

## **Публикации автора по теме диссертации**

### **В изданиях из списка ВАК РФ**

1. *Ветчанин, Е. В.* Модель безвинтового подводного робота / Е. В. Ветчанин [и др.] // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. — 2015. — т. 25, № 4. — с. 544–553. — (0,33 п. л. / 0,28 п. л.; ВАК).

### **В изданиях, входящих в международную базу цитирования Web of Science**

2. *Karavaev, Y. L.* Experimental investigations of the controlled motion of a screwless underwater robot / Y. L. Karavaev, A. A. Kilin, A. V. Klekovkin // Regular and Chaotic Dynamics. — 2016. — Vol. 21, no. 7-8. — P. 918–926. — (0,21 п. л., WoS).

3. *Karavaev, Y. L. A Simple Physical Model for Control of an Propellerless Aquatic Robot / Y. L. Karavaev [и др.] // Journal of Mechanisms and Robotics. — 2020. Направлена в журнал.*

### **В сборниках трудов конференций**

4. *Калинкин, А. А. Разработка модели безвинтового подводного робота / А. А. Калинкин, А. В. Клековкин // Молодые ученые - ускорению научно-технического прогресса в XXI веке. Сборник материалов IV Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием. — 2016.*
5. *Klekovkin, A. V. Model development of a screwless underwater robot / A. V. Klekovkin, I. S. Mamaev // Sixth International Conference Geometry, Dynamics, Integrable Systems – GDIS 2016. — 2016.*
6. *Клековкин, А. В. Модель безвинтового надводного робота с внутренним ротором / А. В. Клековкин [и др.] // XXX Международная инновационная конференция молодых учёных и студентов (МИКМУС-2018). — 2019. — с. 472—475.*
7. *Klekovkin, A. V. A dinamic study of screwless fish-like robot with internal rotor / A. V. Klekovkin, E. V. Vetchanin, I. S. Mamaev // ANS Conference Series: Scientific heritage of Sergey A. Chaplygin (Nonholonomic mechanics, vortex structures and hydrodynamics). Book of Abstracts. — 2019. — с. 96—98.*
8. *Klekovkin, A. V. Control screwless fish-like robot with internal rotor / A. V. Klekovkin [и др.] // Extreme Robotics. — 2019. — с. 220—225.*
9. *Klekovkin, A. V. Propellerless aquatic robots / A. V. Klekovkin [et al.] // Proceedings of the 23rd International Conference Series on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, CLAWAR 2020. Vol. 1. — 2020. — P. 404—411.*

### **Патенты РФ**

10. Патент на полезную модель. №172254 РФ. Безвинтовой подводный робот // А.В. Борисов, И.С. Мамаев, А.А. Килин, А.А. Калинкин, Ю.Л. Караваев, А.В. Клековкин, Е.В. Ветчанин. Заявка: 2016144812, 15.11.2016, опубл. 3.07.2017
11. № 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
12. № 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*

Динамика и управление недеформируемыми безвинтовыми водными роботами

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 \_\_\_\_\_