

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Гарбуз Михаил Андреевич

**Динамика механических систем, способных
перемещаться в произвольном направлении за счёт
преобразования энергии потока среды**

1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2026

Диссертация подготовлена на кафедре теоретической механики и мехатроники механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Научные руководители — *Самсонов Виталий Александрович, доктор физико-математических наук*
Климина Любовь Александровна, кандидат физико-математических наук

Официальные оппоненты — *Буров Александр Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральный исследовательский центр "Информатика и управление" Российской академии наук, лаборатория механики систем, ведущий научный сотрудник*
Родников Александр Владимирович, доктор физико-математических наук, доцент, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), кафедра «Мехатроника и теоретическая механика», профессор
Борисов Андрей Валерьевич, доктор физико-математических наук, доцент, Филиал Национального исследовательского университета МЭИ в г. Смоленске, кафедра высшей математики, профессор

Защита диссертации состоится 27.02.2026 г. в 16 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, Главное здание МГУ, механико-математический факультет, аудитория 16-10.

E-mail: dissovet.msu.011.7@math.msu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3763>.

Автореферат разослан 26.01.2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

М.А. Муницина

Общая характеристика работы

В работе выполнен качественный анализ динамики трёх механических систем, способных совершать движение в горизонтальной плоскости под действием потока ветра. Эти системы объединены наличием ветро-приёмного элемента с горизонтальной или вертикальной осью вращения, который связан с основным приводом. Первая система представляет собой катамаран с установленным на него воздушным пропеллером и гребным винтом. Ветроприемный пропеллер преобразовывает энергию ветра в энергию вращения и передает ее посредством трансмиссии гребному винту. Вторая система — шагающий аппарат, снабжённый ветротурбиной пропеллерного типа. Вращение турбины преобразуется во вращение ведущего вала аппарата. Допускается только прямолинейное движение без проскальзывания и опрокидывания. Третья система — катамаран, силовым приводом которой выступает ротор Савониуса. Ось ротора через редуктор связана с валом гребного винта. Катамаран совершает движение в горизонтальной плоскости вдоль продольной оси, проходящей через вал гребного винта.

Актуальность темы. Испокон веков человечество использует энергию ветра для различных прикладных целей. В древности с помощью ветра осуществлялся размол зерна, подъём воды в засушливых районах, приводился в движение парусный флот; современные установки преобразуют ветер в электричество. Центральной задачей, стоящей перед механическими и робототехническими устройствами, является перемещение в горизонтальной плоскости. При этом в качестве источника энергии для такого перемещения представляется актуальным использование энергии ветра. Такие устройства способны длительное время работать в отдаленных районах, обходясь без тяжелых аккумуляторов. Более того, широки перспективы применения таких аппаратов для исследования небесных тел. Если небесное тело обладает атмосферой, то целесообразно использовать энергию ветра, например, для перемещения аппарата в темное время суток.

Исследование аппаратов, движущихся за счёт энергии ветра, естественным образом связано с задачей о движении системы тел в сопротивляющейся среде. За прошедшее столетие сложилось широкое разнообразие подходов к моделированию такого движения. Как известно из механики сплошных сред, движение тела в вязкой среде следует моделировать с помощью уравнений Навье-Стокса с условием прилипания на границе. Этот подход позволяет получить довольно точные результаты, однако связан с большими трудозатратами. Например, если диапазон исследуемых параметров системы велик, то численный анализ не удаётся провести за разумное время. Требуется следить не только за положением тела в пространстве, но и детально описывать то, как движется среда. С точки зрения современных вычислительных средств эта задача до сих пор не получила

исчерпывающего решения. Поэтому для моделирования сложных объектов в потоке используют различные упрощения.

Среди них распространение получил так называемый квазистатический подход, ухватывающий основные особенности поведения тела. Описание воздействия потока строится при помощи информации только о мгновенном состоянии тела. Такой подход существенно упрощает численный анализ и позволяет использовать инструменты теоретической механики и теории дифференциальных уравнений для исследования поведения вращающегося тела в потоке среды. Представляется уместным связать квазистатический подход с результатами экспериментального исследования аэро- и гидродинамики и составить обобщённую феноменологическую модель. Этот способ будет раскрыт в первой главе диссертации и далее с его помощью будет составлено описание систем во второй и третьей главах.

При проектировании мобильного транспортного устройства, перемещающегося за счёт энергии ветра, сложной задачей является достижение следующих нетривиальных свойств: устройство должно напрямую преобразовывать энергию ветра в движение; система должна быть способна поддерживать прямолинейное движение навстречу ветру; транспортное средство должно быть максимально нечувствительным к свойствам опорной поверхности и характеристикам рельефа местности, насколько это возможно.

Целью данной работы является качественный анализ динамики механических систем, способных совершать движение в горизонтальной плоскости под действием потока ветра. Каждая из рассматриваемых систем содержит ветроприёмный элемент с горизонтальной или вертикальной осью вращения, который связан с основным приводом.

В первой главе рассмотрен катамаран, на корпус которого установлена ось с воздушным пропеллером и гребным винтом. Пропеллер преобразует энергию ветра в энергию вращения и передает ее посредством трансмиссии гребному винту.

Во второй главе предложена модель шагающего аппарата, снабжённого ветротурбиной пропеллерного типа. Вращение турбины преобразуется во вращение ведущего вала аппарата. Допускается только прямолинейное движение без проскальзывания и опрокидывания.

Третья глава посвящена исследованию катамарана, приводимого в движение ротором типа Савониуса с вертикальной осью вращения. Ось ротора через редуктор связана с валом гребного винта. Катамаран совершает движение в горизонтальной плоскости вдоль продольной оси, проходящей через вал гребного винта.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи.

1. Смоделировать аэродинамическое воздействие потока воздуха на движущийся ротор. При этом требуется, чтобы подход, во-первых, основывался на информации только о мгновенном состоянии движения ротора, во-вторых, учитывал влияние на аэродинамические характеристики ротора его ориентации в потоке и скорости вращения в каждый момент времени.
2. Построить описание гидродинамического воздействия на лопасти гребного винта. Модель должна учитывать зависимость возникающих реакций от вращения винта, скорости поступательного движения и геометрических характеристик.
3. Создать и проанализировать математическую модель плавательного катамарана с воздушным пропеллером и гребным винтом. Исследовать вопрос существования стационарного режима движения, при котором корпус катамарана движется навстречу ветру. Найти неподвижные точки динамической системы и исследовать их устойчивость. Оценить параметры системы, обеспечивающие наивысшую скорость движения корпуса против ветра. Провести численное моделирование динамики установки.
4. Создать лабораторный макет катамарана с ветроприёмным пропеллером и гребным винтом. Провести серию экспериментов, направленную на определение наилучших с точки зрения максимизации скорости движения корпуса размеров пропеллера и гребного винта.
5. Составить математическую модель шагающего аппарата с пропеллерной ветротурбиной. Исследовать возможность прямолинейного движения такого аппарата навстречу ветру за счёт энергии ветра.
6. Изучить установившиеся режимы движения шагающего аппарата под действием ветра. Провести параметрический анализ таких режимов.
7. Построить прототип шагающего аппарата. Продемонстрировать экспериментально возможность движения шагающего аппарата навстречу ветру.
8. Для катамарана с ротором Савониуса и гребным винтом проанализировать возможность стационарного движения навстречу ветру. Рассмотреть задачу о переводе центра масс катамарана против ветра между двумя прямыми, ортогональными потоку ветра, за наименьшее время.

Методология и методы исследования. В работе развивается феноменологический подход для описания аэродинамического воздействия потока на пропеллер, а также гидродинамического воздействия на гребной

винт. Он основан на известном квазистатическом подходе с привлечением описанных в научной литературе экспериментальных данных, характеризующих поведение вращающихся тел в потоке среды. Проведен сравнительный анализ с известными ранее экспериментальными и численными результатами исследований с подобными роторами.

Анализ механических систем, содержащих роторы рассматриваемого типа, выполнен с использованием предложенной аэро- гидродинамической модели роторов, известных аналитических и численных методов теоретической механики, теории устойчивости движения и теории дифференциальных уравнений. Проверка аналитических результатов и символьные вычисления выполнялись в системах компьютерной алгебры. Для проведения численных экспериментов использовались методы интегрирования дифференциальных уравнений, выполняемые в программе Wolfram Mathematica.

Достоверность и обоснованность результатов обеспечивается экспериментальной проверкой основных гипотез и применяемых математических моделей. Часть результатов диссертационной работы получена аналитически на основании строгих математических методов, в работе приведены их подробные доказательства. Результаты работы были доложены на всероссийских и международных конференциях, а также подвергнуты рецензированию при публикации в научных журналах.

Научная новизна:

1. Продемонстрированы новые свойства механических систем, содержащих ветроприёмный ротор и использующих его в качестве основного силового привода.
2. Построена математическая модель, описывающая динамику катамарана с ветроприёмным пропеллером и гребным винтом. Продемонстрировано существование двух стационарных режимов движения катамарана, один из которых соответствует движению против ветра. Описаны условия устойчивости этих режимов. В частном случае аналитически доказано отсутствие периодических режимов движения. Проведено численно-аналитическое исследование того, как характеристики установившихся режимов движения зависят от параметров модели. Построены соответствующие бифуркационные диаграммы и элементы фазового портрета системы.
3. Собран действующий макет катамарана с ветродвигателем. Выбраны подходящие значения конструктивных параметров и проведены в лабораторных условиях тестовые испытания, подтверждающие принципиальную возможность движения катамарана за счет ветра против этого ветра. Построена и испытана новая модель двухроторного ветродвигателя, имеющего два соосных

противовращающихся пропеллера и гребных винта. Экспериментально продемонстрированы преимущества такого ветродвигателя перед ранее известными. В частности, новая схема имеет большую тягу и позволяет осуществить выход на режим движения против ветра из состояния покоя.

4. Предложена и реализована модернизация схемы стопоходящей машины П.Л. Чебышёва, позволяющая уменьшить количество соединительных звеньев. На базе этого устройства построен шагающий аппарат, приводом которого является горизонтально-осевая ветротурбина пропеллерного типа. Для этого аппарата разработана математическая модель в форме динамической системы второго порядка. Установлены достаточные условия существования притягивающего периодического режима движения навстречу ветру, а также достаточные условия наличия неустойчивого периодического режима, ограничивающего область притяжения первого. Проведён параметрический анализ.
5. Разработан и собран лабораторный макет шагающего аппарата с пропеллерной ветротурбиной. Возможность организации движения шагающего аппарата против ветра за счёт энергии ветра впервые продемонстрирована теоретически и экспериментально.
6. Разработана математическая модель плавательного катамарана, приводом которого является гребной винт и установленный на корпус ротор Савониуса с вертикальной осью вращения. Установлена возможность прямолинейного движения против ветра за счёт энергии ветра. Исследовано поведение катамарана при различном курсе движения относительно потока ветра. Показано, что при движении под боковым ветром проекция скорости корпуса на направление ветра выше, чем скорость корпуса при прямолинейном движении навстречу ветру.

Все основные результаты, полученные в диссертационной работе, и положения, выносимые на защиту, являются новыми.

Теоретическая и практическая значимость данной работы обусловлена необходимостью поиска новых сфер применения возобновляемой энергии. Разработанный метод описания динамики ветроприёмных роторов и гребных винтов на основе квазистатического подхода с привлечением экспериментальных данных может быть использован инженерами для проектирования автономных мобильных систем. Показана возможность прямолинейного движения шагающего аппарата навстречу ветру за счёт энергии ветра. Разработка автономных ветроходных устройств открывает перспективы для исследований в экстремальных условиях низких температур, пустынях, а также на планетах с атмосферой. Катамаран с

вертикальным ротором и гребным винтом может стать базой для создания автономных судов, способных перемещаться на дальние расстояния.

Личный вклад. Все результаты, выносимые на защиту, принадлежат лично автору. В работе [2] научные руководители участвовали в постановке задачи, обсуждении методов исследования и интерпритации полученных результатов. Личный вклад автора в работе [2] заключается в проведении параметрического анализа математической модели и организации экспериментальных испытаний, в ходе которых была зарегистрирована возможность движения шагающего аппарата против ветра. В работе [3] автором была предложена постановка задачи. Личный вклад автора заключается также в построении бифуркционных диаграмм, анализе зависимости скорости движения катамарана от параметров системы и определении оптимального угла курса, обеспечивающего максимальную проекцию скорости катамарана на направление против ветра.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. В стационарном горизонтальном потоке ветра для катамарана с ветроприёмным пропеллером и гребным винтом существует область значений параметров конструкции, при которых реализуются два установившихся режима прямолинейного движения с качественно различной устойчивостью: один режим является притягивающим и соответствует движению корпуса навстречу ветру, а второй — отталкивающим и представляет собой неустойчивое движение.
2. Если гидродинамическое сопротивление корпуса катамарана пре-небрежимо мало по сравнению с силой лобового сопротивления пропеллера и отношение угловой скорости пропеллера к угловой скорости гребного винта больше либо равно единице, то для неподвижной точки, соответствующей режиму движения катамарана навстречу ветру, не происходит бифуркации Андронова–Хопфа.
3. Шагающий аппарат с пропеллерной ветротурбиной способен совершать движение навстречу горизонтальному стационарному потоку ветра за счёт энергии этого потока. При увеличении момента инерции ветроприёмного пропеллера расширяется область притяжения этого режима. Установлено существование параметров конструкции, при которых аппарат выходит на режим движения против ветра из состояния покоя. Такой тип движения подтверждён экспериментально."
4. Если ротор Савониуса с вертикальной осью вращения установлен на катамаран таким образом, что его вращение передаётся гребному винту, ротор находится в стационарном горизонтальном потоке ветра, а движение системы ограничено горизонтальной плоскостью и происходит без возможности опрокидывания и крена вдоль

оси, проходящей через вал гребного винта, то существует притягивающий режим движения катамарана, при котором ось его ротора движется прямолинейно навстречу ветру.

5. Прямолинейное движение катамарана с ротором Савониуса и гребным винтом навстречу ветру не обеспечивает наивысшую скорость перемещения вверх по потоку между двумя прямыми, ортогональными ветру. За счёт изменения курса можно увеличить проекцию скорости корпуса на направление ветра на 30%.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались автором и обсуждались на следующих конференциях и научных семинарах:

1. Международная конференция International Conference on Mathematical Modelling in Mechanics and Engineering (ICME), Сербия, Белград, Mathematical Institute SANU (2022, 2024).
2. Международная конференция 10th European Nonlinear Dynamics Conference (ENOC), Франция, Лион (2022).
3. Международная конференция 16th International Conference «Dynamical Systems – Theory and Applications» (DSTA), Польша, Лодзь (2022).
4. Международная конференция «Устойчивость и колебания нелинейных систем управления» (конференция Пятницкого), Россия, Москва, ИПУ РАН (2018).
5. Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов», Россия, Москва, МГУ имени М.В. Ломоносова (2018, 2020, 2021).
6. Международная научная конференция «Фундаментальные и прикладные задачи механики (FAPM)», Россия, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана (2021-2022).
7. Международная научная конференция по механике «IX Поляховские чтения», Россия, Санкт-Петербург (2021).
8. Международная научная конференция «Динамические системы: устойчивость, управление, оптимизация» (DSSCO'21) памяти профессора Р.Ф. Габасова, Беларусь, Минск, БГУ (2021).
9. Всероссийская Конференция с международным участием «Биомехатронные системы: задачи, теория, технологии», Россия, Махачкала (2021).
10. Всероссийская конференция молодых ученых-механиков, YSM, Россия, Сочи, МГУ имени М.В. Ломоносова (2018, 2020 – 2024).
11. Научная конференция «Ломоносовские чтения», Россия, Москва, МГУ имени М.В. Ломоносова (2023-2024).
12. XIII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, Россия, Санкт-Петербург, СПбПУ (2023).

13. Конференция-конкурс молодых ученых НИИ механики МГУ, Россия, Москва, МГУ имени М.В. Ломоносова (2017-2024)
14. Учебно-научный семинар «Механические задачи с особенностями», Россия, Москва, МГУ имени М.В. Ломоносова (2021–2023)
15. Семинар имени В.В. Румянцева по аналитической механике и теории устойчивости, Россия, Москва, МГУ имени М.В. Ломоносова (2021, 2022)
16. Семинар «Гамильтоновы системы и статистическая механика», Россия, Москва, МИАН им. В.А. Стеклова (2022)

Работа, основанная на результатах, представленных в диссертации, стала победителем конкурса молодых учёных УМНИК (2018) и в 2023 году была отмечена золотой медалью РАН в конкурсе для студентов (выпускников) ВУЗов России.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 14 печатных работах, 3 из которых изданы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности и отрасли наук

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Полный объем диссертации **113** страниц текста с **47** рисунками и 4 таблицами. Список литературы содержит **111** наименование.

Основное содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, посвящённых разработке механических устройств, способных преобразовывать энергию ветра в движение. Проводится обзор научной литературы по моделированию движения тел в сопротивляющейся среде, обсуждаются различные подходы: от численного решения уравнений Навье-Стокса до квазистатических моделей.

Обосновывается целесообразность использования квазистатического подхода в сочетании с экспериментальными данными аэро- и гидродинамики для построения феноменологических моделей. Такой подход позволяет применить инструменты теоретической механики и теории дифференциальных уравнений для анализа динамики систем в потоке среды.

Формулируется цель работы — качественный анализ динамики механических систем, способных совершать движение в горизонтальной плоскости под действием потока ветра. Ставятся три основные задачи:

1. Смоделировать аэродинамическое воздействие потока воздуха на движущийся ротор, учитывающее его ориентацию в потоке и скорость вращения;

2. Построить описание гидродинамического воздействия на лопасти гребного винта в зависимости от его вращения и поступательного движения;
3. Создать и проанализировать математические модели трёх различных механических систем и исследовать условия существования и устойчивости стационарных режимов движения против ветра.

Излагаются научная новизна работы (доказательство существования нетривиальных стационарных режимов движения против ветра, анализ устойчивости на основе методов теории нелинейных динамических систем, экспериментальное подтверждение) и практическая значимость представляемой работы (разработка экологически чистых мобильных устройств для длительной работы в удалённых районах и на небесных телах с атмосферой).

В последующих трёх главах сначала описывается общий принцип моделирования на основе квазистатического подхода, позволяющий описать воздействие потока среды при помощи информации только о мгновенном состоянии системы, а потом идёт апробация этого подхода на трёх частных примерах: плавающий катамаран с воздушным пропеллером и гребным винтом, шагающий аппарат на механизме Чебышёва с пропеллерной турбиной, и плавающий катамаран с вертикальным ротором Савониуса и гребным винтом.

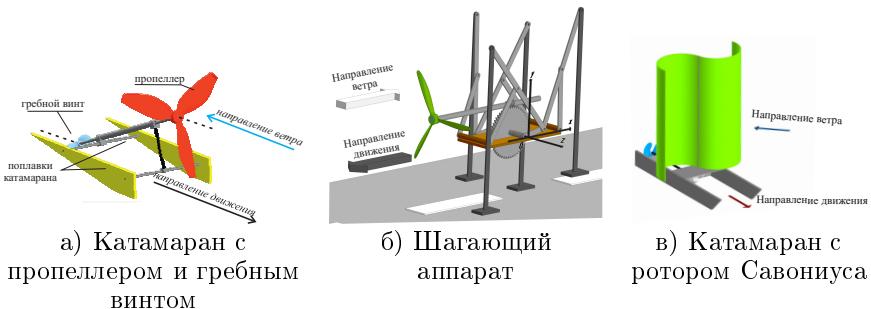


Рисунок 1 — Три типа исследуемых механических систем.

Первая глава посвящена исследованию движения плавающего катамарана с воздушным пропеллером и гребным винтом, связанными трансмиссией с коэффициентом передачи n .

Описывается математическая модель системы на основе уравнений механики. Представлены схема катамарана с двумя поплавками, вращающимся пропеллером и гребным винтом, обсуждаются силы и моменты,

действующие на систему: аэродинамический момент и лобовое сопротивление пропеллера, гидродинамические момент и тяга гребного винта, сопротивление движению корпуса.

Сперва предложено упрощённое описание воздействия потока на лопасти пропеллера и гребного винта: лопасти представляются тонкими прямоугольными пластинами. Показано, что для малых углов атаки можно использовать линейные аппроксимации аэро- и гидродинамических коэффициентов, что значительно упрощает анализ и позволяет получить аналитические результаты. Показано существование стационарного режима движения, при котором корпус катамарана движется прямолинейно навстречу ветру.

Далее проводится обобщение модели с использованием экспериментальных данных для коэффициентов момента и аэро/гидро-динамического сопротивления. Вводятся безразмерные переменные и параметры системы. Исследуются стационарные режимы движения и условия их устойчивости. Показано существование параметров, при которых одновременно возможны несколько стационарных режимов движения, среди которых один режим является отталкивающим. Проводится линеаризация динамической системы в окрестности положений равновесия, выводятся условия асимптотической устойчивости. Доказано, что при отсутствии гидродинамического сопротивления корпуса и коэффициенте передачи $n \geq 1$ (когда пропеллер вращается быстрее гребного винта) для режима движения против ветра не происходит потери устойчивости через бифуркацию Андронова-Хопфа.

Проводится параметрический анализ для нахождения оптимального соотношения размеров пропеллера и гребного винта $\sigma_{opt} = r_a/r_w$, при котором на режиме движения против ветра достигается максимум относительной скорости $y = u/v$. Исследуется влияние коэффициента передачи на развивающую скорость катамарана.

Описываются экспериментальные исследования на двух прототипах (однороторная и двухроторная конструкции). Приведены результаты измерений, подтверждающие гипотезы математической модели.

Вторая глава посвящена исследованию шагающего аппарата на базе четырёхного механизма, построенного на основе λ -механизма Чебышёва.

Описывается механическая система: четыре ноги с кривошипно-шатунными механизмами, платформа корпуса, пропеллерная ветротурбина, установленная на корпусе, передающая крутящий момент на ведущий вал.

Проводится кинематический анализ λ -механизма Чебышёва. Выводятся функции, описывающие положение центра масс платформы и её скорость в зависимости от угла поворота кривошипа. Доказывается, что

механизм допускает прямолинейное движение без проскальзывания в течение фазы опоры.

Вычисляются кинетическая и потенциальная энергия всех компонент системы (кривошипов, шатунов, бёдер, голеней, платформы, пропеллера). Для описания аэродинамического воздействия среды на механизм используется квазистатический подход в полной аналогии с первой главой.

Уравнения движения составляются с использованием формализма Лагранжа. Механизм описывается системой одной обобщённой координатой — углом поворота кривошипа φ .

Далее применяются методы Андронова-Понtryгина для исследования периодических режимов движения. Выводятся достаточные условия существования самоподдерживающегося движения, при котором механизм движется против ветра.

Проводится параметрический анализ с использованием численного моделирования. Определяются оптимальные значения коэффициента передачи механизма для развития наивысшей скорости и широкой области притяжения траекторий.

Описывается экспериментальный прототип, созданный на основе математической модели. Приведены результаты испытаний в аэродинамической трубе, подтверждающие возможность движения против ветра.

Третья глава посвящена исследованию катамарана, приводимого в движение ротором типа Савониуса с вертикальной осью вращения.

Дано описание математической модели. Ротор Савониуса соединён через редуктор с валом гребного винта. Катамаран совершает движение в горизонтальной плоскости вдоль продольной оси, проходящей через вал гребного винта.

Исследуется возможность движения системы строго против ветра. Анализируются стационарные режимы движения в продольном направлении, при которых корпус катамарана имеет положительную скорость относительно потока.

Проводится анализ стационарных режимов в зависимости от параметров системы. Исследуется влияние радиуса ротора, радиуса гребного винта и других конструктивных параметров на достижимую скорость.

Исследуется оптимальный угол курса относительно направления ветра. Показано, что максимум скорости проекции движения на направление ветра достигается при угле, примерно 43° . За счёт изменения курса можно увеличить проекцию скорости корпуса на направление ветра на 30% по сравнению с прямолинейным движением навстречу ветру.

Заключение

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Разработана единая методология моделирования механических систем в потоке среды на основе квазистатического подхода в сочетании с экспериментальными данными аэро- и гидродинамики. Доказано существование и устойчивость нетривиальных стационарных режимов движения против ветра для трёх различных типов механических систем (плавающие катамараны и шагающий аппарат).
2. Показана эффективность использования методов теории нелинейных динамических систем (анализ устойчивости, бифуркационный анализ) для исследования поведения механических систем в потоке среды. Получены аналитические условия существования и устойчивости стационарных режимов.
3. Созданы и протестированы два функционирующих прототипа различной конструкции, подтверждающих возможность прямолинейного движения навстречу ветру за счёт энергии ветра. Получены количественные данные об эффективности преобразования энергии ветра в поступательное движение.

Основные результаты по темам первой, второй и третьей глав опубликованы в работах [1–3]. Результаты диссертации неоднократно докладывались на всероссийских и международных конференциях.

Разработанный подход может быть применён для исследования более сложных систем, совершающих пространственное движение. Может быть построено управление направлением движения и проведена оптимизация конструкции для практических приложений.

Публикации автора по теме диссертации. По результатам выполненных исследований опубликованы следующие статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности и отрасли наук:

1. *Гарбуз М.А.* Динамическая модель судового ветродвигателя с трансмиссией // Вестник Московского университета. Серия 1: Математика. Механика. — 2022. — Т. 1, №1. — С. 68–71 (Импакт-фактор 0,198 (РИНЦ), EDN: WUERJZ, 0,47 п.л.) = *Garbuz M. A. Dynamic Model of Ship Wind Turbine with Transmission // Moscow University Mechanics Bulletin. — 2022. — Vol. 77, № 1. — P. 27–31* (Импакт-фактор 0.268 (SJR), EDN: LVESUB, 0,47 п.л.).
2. *Garbuz M. A., Klimina L. A., Samsonov V. A.* Wind driven plantigrade machine capable of moving against the flow // Applied Mathematical Modelling. — 2022. — Vol. 110, №1. — P. 17–27 (SJR 1.126, EDN: TPDNVM, 0,69 п.л. / авторский вклад определен).

3. Гарбуз М.А., Климина Л. А., Самсонов В. А Моделирование динамики катамарана, приводимого в движение с помощью ротора Савониуса и гребного винта // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. — 2024. — № 1. — С. 131–138 (Импакт-фактор 0,881 (РИНЦ), EDN: WJFEMG, 0,65 п.л. / авторский вклад определен) = Garbuz M.A., Klimina L.A., Samsonov V.A. Modeling the Dynamics of a Catamaran Driven by a Savonius Rotor and a Propeller // Journal of Computer and Systems Sciences International, —2024. — Vol. 63, № 1. — P. 141–148 (Импакт-фактор 0.261 (SJR), EDN: VDEDPB, 0,65 п.л.).

Иные публикации:

4. Гарбуз М.А. О движении стопоходящей машины с ветроприводом против среды // Труды конференции-конкурса молодых ученых 19–20 октября 2021 г. М.: Издательство Московского университета. — 2022. — С. 93–100.
5. Гарбуз М.А., Климина Л.А., Самсонов В.А. О движении шагающего аппарата против потока // Международная научная конференция "Фундаментальные и прикладные задачи механики" (7–10 декабря 2021 г., Москва). Материалы конференции. В двух частях. Часть 1. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. — 2021. — С. 196–197.
6. Гарбуз М.А., Самсонов В.А., Климов К.В., Рогачев А.А. Бифуркации ротационных режимов в задаче о движении шагающего механизма в стационарном потоке // Устойчивость и колебания нелинейных систем управления (конференция Пятницкого). Материалы XVI Международной конференции (1–3 июня 2022 г., Москва). М.: ИПУ РАН. — 2022. — С. 115–118.
7. Гарбуз М.А. Математическая модель катамарана с ветродвигателем и трансмиссией // Труды конференции-конкурса молодых ученых 20–22 октября 2020 г. М.: Издательство Московского университета. — 2020. — С. 28–35.
8. Гарбуз М.А., Климина Л.А. Качественный анализ установившихся режимов движения стопоходящей машины с ветроприводом // Динамические системы: устойчивость, управление, оптимизация. Материалы Международной конференции памяти профессора Р. Ф. Габасова. Минск: БГУ. — 2021 г. — С. 71–73.
9. Гарбуз М.А., Климина Л.А. Динамика стопоходящей машины Чебышёва с ветроприводом // IX Поляховские чтения. Материалы международной научной конференции по механике (9–12 марта 2021 г., Санкт-Петербург). СПб.: ООО "Издательство ВВМ". — 2021. — С. 85–87.
10. Гарбуз М.А. Режимы движения ветрокатамарана: устойчивость, бифуркации // Труды конференции-конкурса молодых ученых

- 21–25 октября 2019 г. М.: Издательство Московского университета. — 2019. — С. 36–42.
11. Гарбуз М.А. Катамаран, движущийся против ветра при помощи противовращающихся пропеллерных ветродвигателей // Труды конференции-конкурса молодых ученых 15–17 октября 2018 г. М.: Издательство Московского университета. — 2018. — С. 69–76.
 12. Гарбуз М.А. Катамаран с ветродвигателем // Труды конференции-конкурса молодых ученых 13–17 октября 2017 г. М.: Издательство Московского университета. — 2018. — С. 47–54.
 13. Garbuz M.A., Holub A.P., Klimina L.A. The modeling of the catamaran equipped with the wind turbine // Proceedings of 2018 14th International Conference Stability and Oscillations of Nonlinear Control Systems (Pyatnitskiy's Conference), STAB 2018. Piscataway, NJ: IEEE. — 2018. — Р. 1–2.
 14. Гарбуз М.А., Голуб А.П., Климина Л.А. Моделирование динамики катамарана с ветродвигателем // Устойчивость и колебания нелинейных систем управления. Материалы XIV Международной научной конференции (30 мая – 1 июня 2018 г., Москва) / Ред. В. Н. Тхай. М.: ИПУ РАН. — 2018. — С. 104–107.