

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

*На правах рукописи*



*Подпись аспиранта*

Козлович Андрей Владимирович

*ФИО аспиранта*

МОБИЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТНЫЙ РОБОТ НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ

*наименование темы научно-квалификационной работы (заглавными буквами)*

15.06.01 – Машиностроение

*отрасль науки (шифр и наименование научной специальности)*

15.06.01\_03 – Роботы, мехатроника и робототехнические системы

*наименование направленности (шифр и наименование направления)*

Академическая степень Исследователь, Преподаватель-исследователь

## НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

Научный руководитель: д.т.н., профессор, доцент, Волков Андрей  
Николаевич

*ученая степень, ученое звание, должность, ФИО полностью*

Санкт-Петербург, 2022

Научный доклад выполнен в Высшей школе автоматизации и робототехники Института машиностроения, материалов и транспорта федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Научный руководитель: д.т.н., профессор, доцент ВШАиР (ФГАОУ ВО СПбПУ), Волков Андрей Николаевич  
*ученая степень, ученое звание, должность, ФИО полностью*

---

Рецензент: к.т.н., доцент, доцент ВШАиР (ФГАОУ ВО СПбПУ) Попов Аркадий Николаевич  
*ученая степень, ученое звание, должность, ФИО полностью*

---

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>.

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## Актуальность работы

Комплексная автоматизация производственных систем часто невозможна без использования автоматизированных транспортных платформ большой грузоподъемности. Платформы используются не только для перемещения деталей между производственными участками, но и для сборки и монтажа крупногабаритного технологического оборудования.

Учитывая габариты и массы изделий, которые при монтаже надо перемещать друг относительно друга с высокой точностью в условиях отсутствия традиционной грузоподъемной техники, проблема плавного, без рывков, обусловленных трением, перемещения сборочных элементов представляется весьма актуальной. Перспективным вариантом решения данной проблемы является использование разнообразных мобильных роботизированных транспортных платформ. Такое решение позволит существенно упростить и в перспективе автоматизировать работу с крупногабаритными изделиями.

У платформ большой грузоподъемности с воздушной подушкой имеется существенный недостаток, связанный с высокими энергозатратами на нагнетательную установку.

Характерной чертой современных транспортных средств на воздушной подушке является их универсальность в вопросах рельефа, по которому они перемещаются. Это достигается за счет так называемого эффекта планирования – машина висит на некоторой высоте над поверхностью, в следствии чего наличие неровностей и иных препятствий для нее не существенно.

Для реализации эффекта планирования необходима мощная нагнетательная установка, за счет которой и создается данный эффект. Действительно, поскольку полость под транспортным средством не является

замкнутой, необходимо постоянно вкачивать в нее существенные объемы воздуха, чтобы поддерживать необходимое избыточное давление, требуемое для создания эффекта планирования.

При использовании воздушной подушки в мобильных транспортных системах в качестве устройства компенсации веса возникает иная ситуация. Рассматриваемые системы перемещаются в пределах цехового пространства, для которого характерно наличие ровного пола. Таким образом, нет необходимости в создании эффекта планирования и, как следствия, гарантированного зазора между уплотнением и полом.

Все вышесказанное говорит об актуальности темы данной работы.

### **Цель и задачи исследования**

Цель данной работы – повышение энергоэффективности мобильных транспортных роботов на воздушной подушке.

Для достижения указанной цели необходимо решить ряд задач:

1. Классификация профилей неровностей покрытия и разработка подходов к его моделированию.
2. Разработка математической модели уплотнителя воздушной подушки мобильного робота для исследования зависимости утечек от конструктивных параметров при различных режимах работы.
3. Разработка математической модели уплотнителя воздушной подушки мобильного робота для исследования зависимости величины сил трения от конструктивных параметров при различных режимах работы.
4. Разработка математической модели уплотнителя воздушной подушки мобильного робота для исследования влияния его геометрии на силы и моменты сопротивления ее движению в различных режимах работы.

5. Разработка методики оптимизации конструктивных и эксплуатационных параметров работа по критерию минимизации потребляемой мощности и энергии.

### **Научная новизна**

Научная новизна исследований, проведенных в научно-квалификационной работе, заключается в следующем:

1. Предложена классификация поверхностей перемещения по величине шероховатости и неплоскостности.
2. Предложена математическая модель для стационарной системы «уплотнение-поверхность перемещения» и установлена функциональная зависимость между расходом, давлением, шероховатостью поверхности, ее неплоскостностью, а также взаимным положением уплотнения и поверхности перемещения.
3. Предложена математическая модель системы «уплотнение-поверхность перемещения» для типовых траекторий движения и установлена функциональная зависимость между силами трения, шероховатостью поверхности, ее неплоскостностью, а также взаимным положением уплотнения и поверхности перемещения.
4. Предложена математическая модель системы «уплотнение-поверхность перемещения» для типовых траекторий движения и установлена функциональная зависимость между геометрией уплотнителя воздушной подушки, давлением и силами, а также моментами сопротивления.
5. На основании разработанной комплексной модели мобильного работа на воздушной подушке установлена функциональная взаимосвязь между энергопотреблением, давлением и геометрией уплотнителя воздушной подушки.

6. Предложена методика оптимизации конструктивных и эксплуатационных параметров робота на воздушной подушке по критерию минимизации потребляемой энергии.

### **Теоретическая и практическая значимость**

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в создании моделей и методик, обеспечивающих научно-обоснованный подход к разработке и эксплуатации мобильных транспортных роботов на воздушной подушке.

### **Апробация работы**

В процессе подготовки работы с целью апробации результатов произведены доклады и выступления на следующих конференциях:

- Международная научно-практическая конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2021», Санкт-Петербург, Россия;
- V всероссийская (с международным участием) научно-практическая конференция научных, научно-педагогических работников, аспирантов и студентов «Современная техника и технологии в электроэнергетике и на транспорте: задачи, проблемы, решения», 2021, Челябинск, Россия;
- V международная научная конференция «Арктика: история и современность», 2020, Санкт-Петербург, Россия;
- Неделя науки СПбПУ, конференция с международным участием, 2020, Санкт-Петербург, Россия;
- Неделя науки СПбПУ, конференция с международным участием, 2018, Санкт-Петербург, Россия.

## **Публикации**

На основе результатов исследования работы опубликовано 7 работ. Из них 4 статьи РИНЦ, 3 опубликованы в журналах, индексируемых в базе Scopus. Кроме того, получено 2 патента на полезную модель.

### **Представление научного доклада: основные положения**

- Классификация поверхностей перемещения по величине шероховатости и неплоскостности.
- Результаты исследования стационарной системы «уплотнение-поверхность перемещения» и описание функциональной зависимости между расходом, давлением, шероховатостью поверхности, ее неплоскостностью, а также взаимным положением уплотнения и поверхности перемещения.
- Результаты исследования системы «уплотнение-поверхность перемещения» для типовых траекторий движения и описание функциональной зависимости между силами трения, шероховатостью поверхности, ее неплоскостностью, а также взаимным положением уплотнения и поверхности перемещения.
- Результаты исследования системы «уплотнение-поверхность перемещения» для типовых траекторий движения и описание функциональной зависимости между геометрией уплотнителя воздушной подушки, давлением и силами, а также моментами сопротивления.
- Результаты исследования комплексной модели мобильного робота на воздушной подушке и описание функциональной зависимости между энергопотреблением, давлением и геометрией уплотнителя воздушной подушки.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** продемонстрирована актуальность темы работы, ее научная новизна, установлена цель исследования, показана как теоретическая, так и практическая значимость. Кроме того, в данном разделе изложены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** научно-квалификационной работы, которая называется «Анализ существующих роботизированных и мехатронных транспортных систем» представлен обзор существующих транспортных систем как общего, так и специального назначения. Приведены примеры уникальных транспортных систем сверхвысокой грузоподъемности – выкатных полей спортивных стадионов. Описаны принципы, лежащие в основе их приводных систем.

Представлена информация об использовании технологии воздушной подушки в технике в целом и для транспортировки различных грузов и объектов в частности.

Во **второй главе** под названием «Разработка математических моделей уплотнителя мобильного транспортного робота на воздушной подушке» рассмотрена поверхность, по которой перемещается мобильный транспортный робот и описаны неровности, присутствующие на ней (рисунок 1). Согласно предложенной классификации, их можно разделить на:

- тип 1: идеально плоский пол, микронеровности отсутствуют;
- тип 2: идеально плоский пол, микронеровности присутствуют (рисунок 1, I);
- тип 3: пол с плавными макронеровностями, имеющими значительный период, микронеровности отсутствуют (рисунок 1, II);
- тип 4: пол с плавными макронеровностями, имеющими значительный период, микронеровности присутствуют (рисунок 1, III).

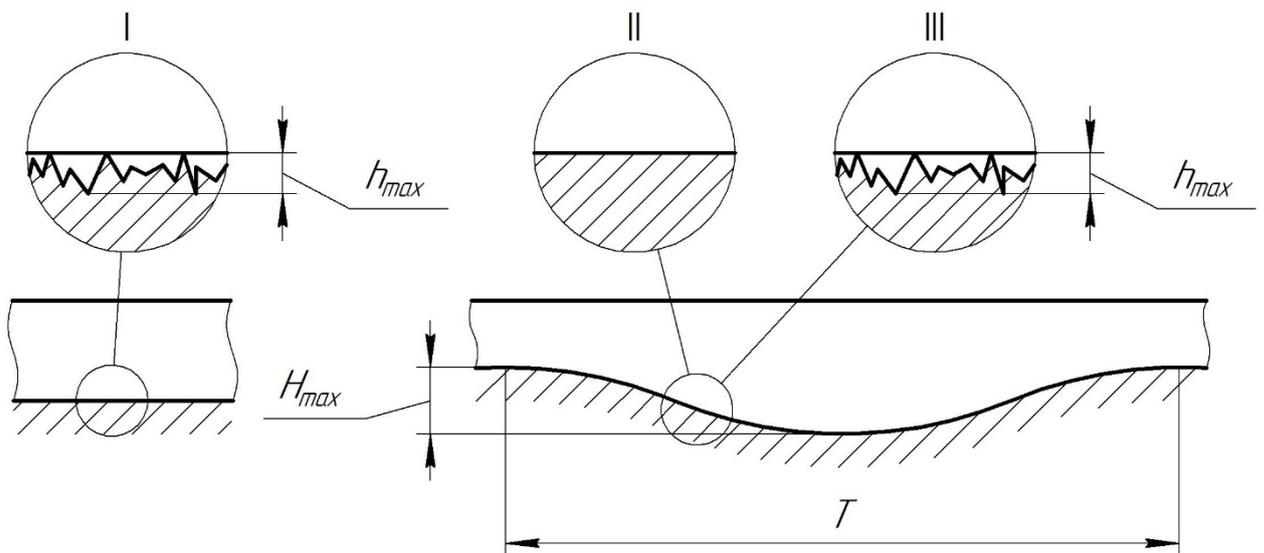


Рисунок 1. Виды неровностей

Показан способ перехода от реального профиля неровности к условному путем его аппроксимации с помощью синусоиды (рисунок 2).

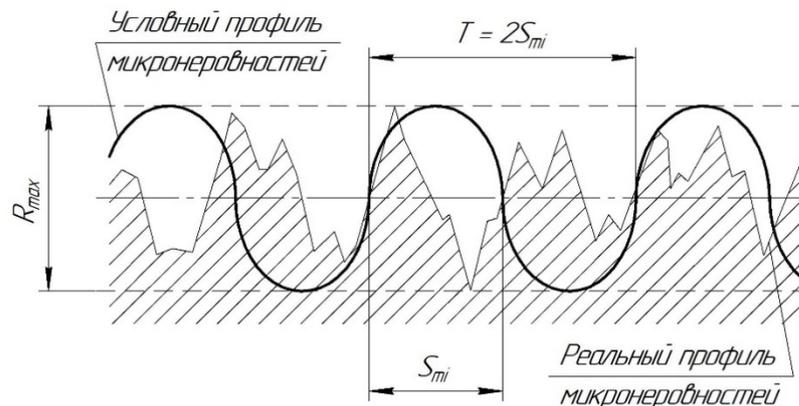


Рисунок 2. Аппроксимация реального профиля неровности

Во второй части данной главы представлена математическая модель прижимного уплотнителя, показывающая зависимость силы трения в зоне контакта уплотнителя и поверхности от величины перекрытия неровностей при их различных параметрах (рисунок 3).

Показано, что существуют соотношения данных параметров, при которых прижимное уплотнение не дает видимого эффекта, т.е. практически не позволяет осуществить перекрытие неровностей. Кроме того, существуют

также соотношения, при которых прижимное уплотнение дает наибольший эффект, перекрывая имеющиеся неровности поверхности полностью.

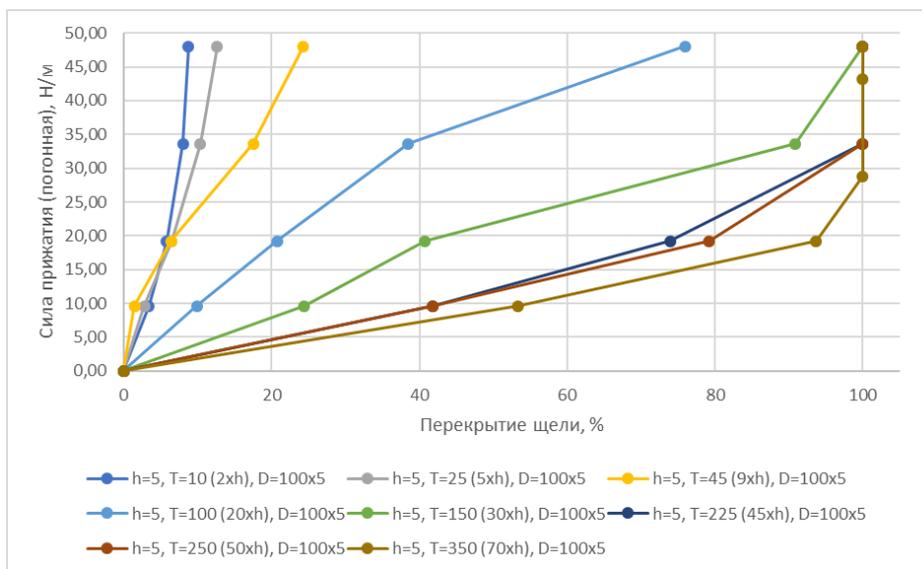


Рисунок 3. Зависимость величины перекрытия щели от силы трения

Для проведения данных симуляций была использована модель гиперупругого материала Муни-Ривлина, для которой необходимые коэффициенты были получены как аналитическим способом, так и с помощью программного комплекса ANSYS Workbench.

В заключительной части второй главы рассматривается поведение уплотнителя воздушной подушки мобильного транспортного робота под действием избыточного давления. Были рассмотрены основные математические модели, описывающие разные этапы функционирования уплотнителя мобильного транспортного робота:

- отсутствие избыточного давления (рисунок 4, а);
- избыточное давление действует на уплотнитель снаружи (рисунок 4, б);
- избыточное давление действует на уплотнитель снаружи и изнутри (рисунок 4, в);
- избыточное давление действует на уплотнитель в процессе движения мобильного робота (рисунок 4, г).

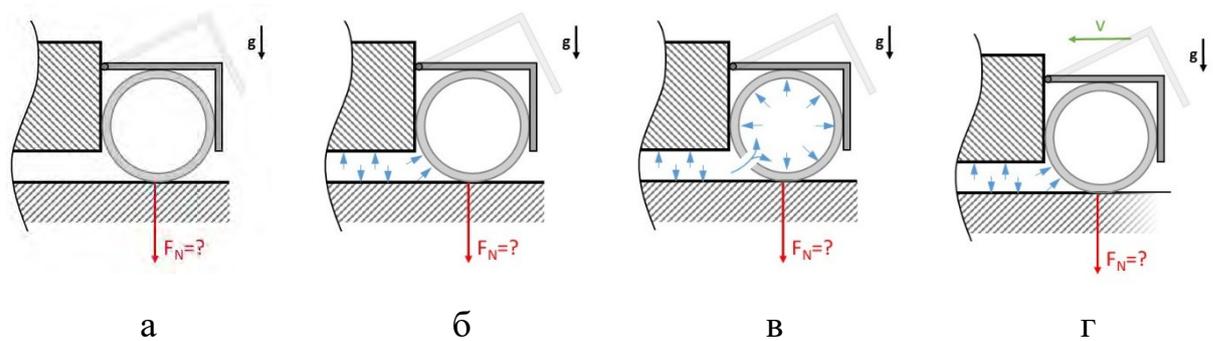


Рисунок 4. Математические модели, описывающие различные этапы функционирования уплотнителя мобильного транспортного робота

Установлено, что при отсутствии давления, действующего на уплотнитель, величина нормальной силы связана с силой, действующей на него со стороны прижима, линейной зависимостью. На величину нормальной силы влияние оказывает коэффициент трения – чем он выше, тем меньше значение нормальной силы. Причиной данного явления является сила трения, возникающая при деформировании уплотнения, и удерживающая его на месте до определенного момента. При отсутствии трения данный эффект исчезает и энергия, которая «блокируется» указанным выше эффектом, переходит во внутренние напряжения.

При воздействии давления на уплотнитель значение нормальной силы снижается на 10% по сравнению с данными, полученными в рамках исследования первой математической модели. Снижение связано с тем, что давление частично компенсирует силу, действующую со стороны прижима. С ростом коэффициента трения величина нормальной силы возрастает.

Дополнительное воздействие давления на внутреннюю поверхность уплотнителя практически не влияет на результат, полученный с помощью второй математической модели (снижение величины нормальной силы составило 2%). Данный эффект может быть более существенен при более высоких значениях избыточного давления.

Анализируя зависимости, полученные в ходе четвертого исследования (рисунок 5), можно отметить множественные пики на условно горизонтальных

участках, описывающих нормальную силу. Они являются следствием прилипания уплотнения к полу. Данный эффект связан с переходом от трения покоя к трению скольжения в процессе движения и может сопровождаться такими эффектами, как шум или рывки. Установлено, что он более выражен при больших коэффициентах трения, поскольку кривая для данного случая имеет более выраженные колебания.

Полученные результаты позволяют повысить эффективность использования мобильных роботизированных платформ на воздушной подушке за счет точной оценки сил сопротивления на этапе проектирования.

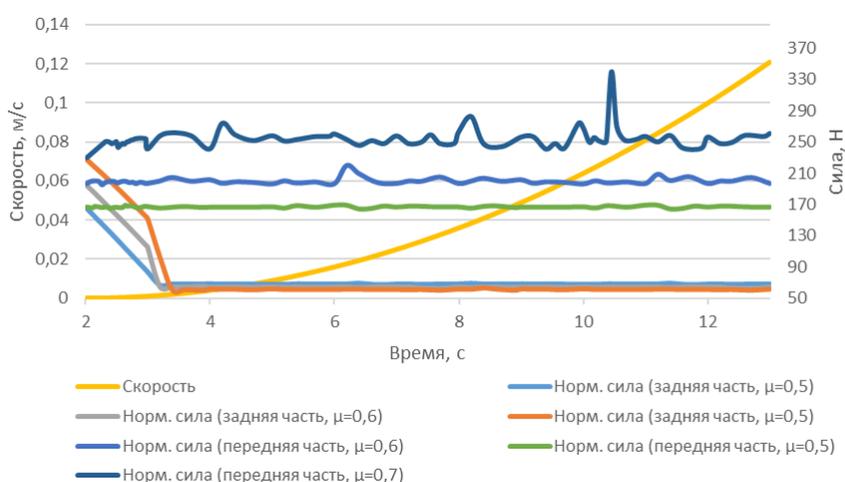


Рисунок 5. Изменение нормальной силы при различных коэффициентах трения и положения уплотнителя в процессе движения мобильного транспортного робота

**Третья глава**, названная «Анализ формы мобильного транспортного робота на воздушной подушке», посвящена построению математической модели уплотнителя воздушной подушки мобильного транспортного робота для анализа и определения его оптимальной формы с точки зрения наименьшей мощности нагнетательной установки.

Рассмотрены три основные формы робота, наиболее часто встречающиеся в технике – круглая, квадратная и прямоугольная. Доказано (рисунок 6), что с точки зрения величины утечек в случае уплотнителя,

функционирующего с гарантированным зазором, наиболее выигрышной является круглая форма.

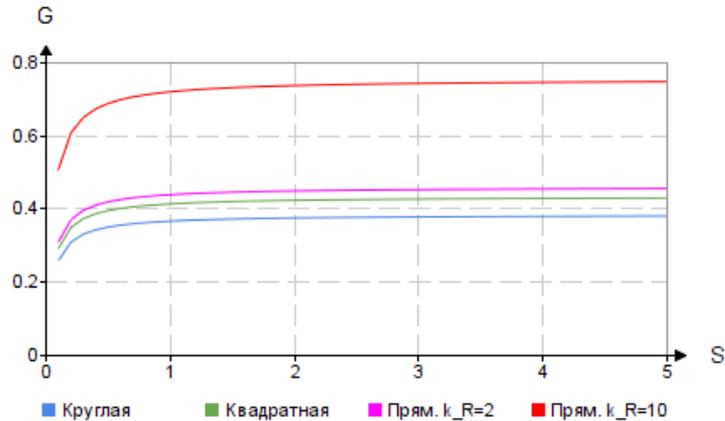


Рисунок 6. Зависимость массового расхода воздуха от площади робота при его разных формах

Установлено, что при использовании прямоугольных форм мобильных роботов необходимо стремиться к минимальному коэффициенту отношения длины к ширине. При этом потребная мощность нагнетателя, лежащего в основе воздушной подушки, зависит от площади и снижается при ее увеличении (рисунок 7).

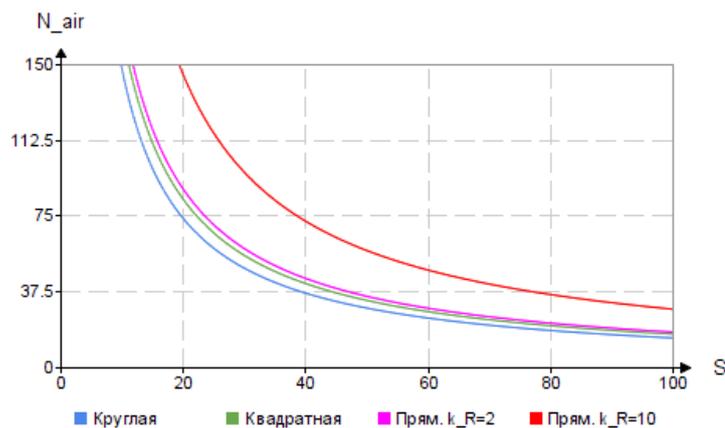


Рисунок 7. Зависимость мощности нагнетателя воздуха от площади робота при его разных формах

Исследована зависимость мощности нагнетателя воздушной подушки от коэффициента  $k$ , определяющего соотношение сторон для прямоугольной

формы робота (рисунок 8). Установлены условия, при которых потребная мощность нагнетателя воздушной подушки прямоугольной формы будет максимально близка аналогичному параметру для круглой формы.

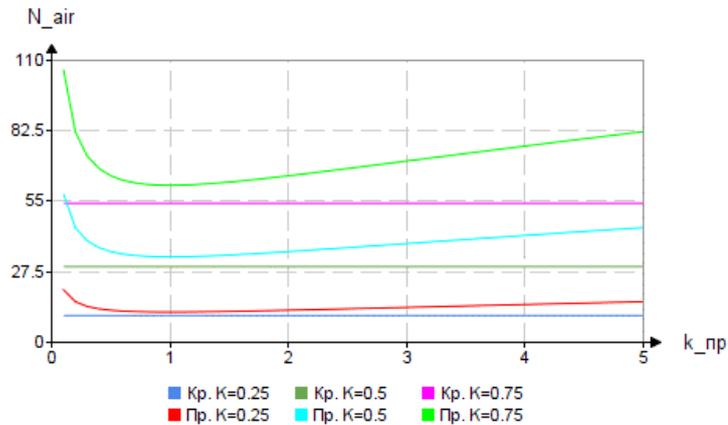


Рисунок 8. Зависимость мощности нагнетателя воздуха от коэффициента соотношения сторон прямоугольного робота при разных значениях коэффициента компенсации

Показано влияние скорости перемещения мобильного транспортного робота на величину мощности, необходимой для преодоления сил сопротивления в зоне контакта уплотнителя и поверхности (рисунок 9).

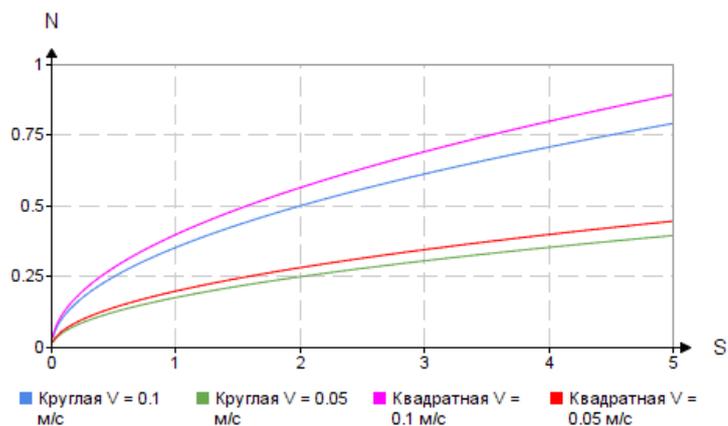
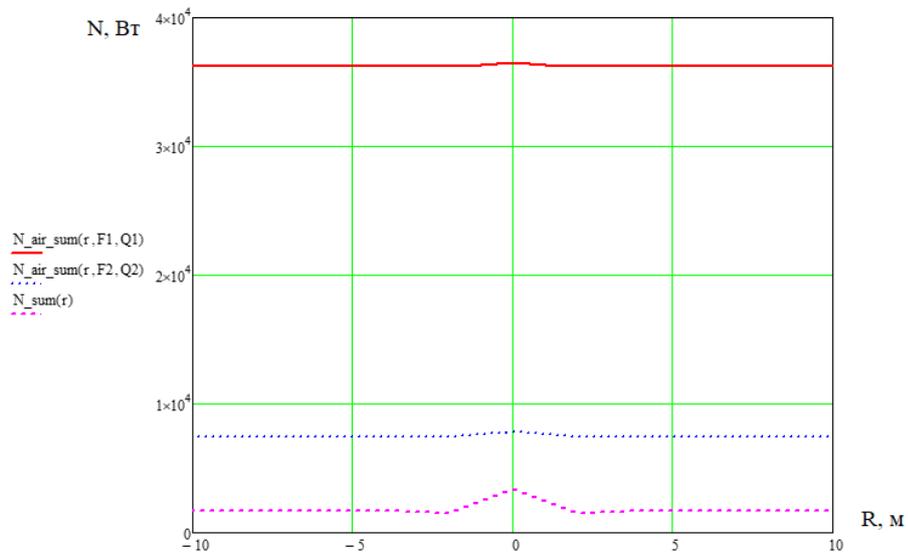


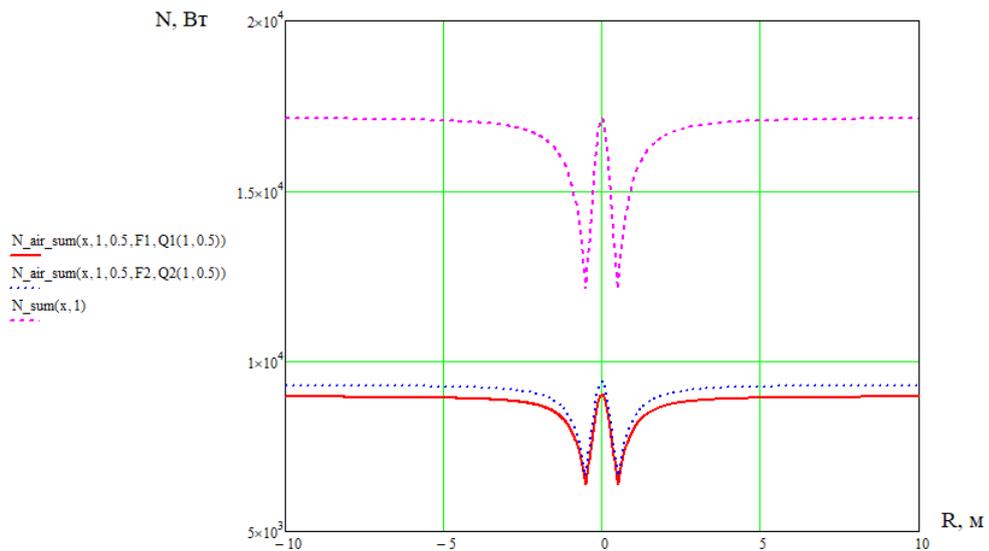
Рисунок 9. Зависимость мощности, затрачиваемой на преодоление сил сопротивления в зоне контакта уплотнителя и поверхности от площади транспортного робота при разных значениях скорости перемещения

При малых площадях системы снижение скорости в два раза позволяет в два раза снизить указанную мощность. С увеличением площади степень снижения мощности возрастает.

В четвертой главе «Анализ энергоэффективности мобильного транспортного робота на воздушной подушке» на основе разработанных математических моделей произведена оценка энергоэффективности мобильного робота транспортной системы.



а



б

Рисунок 10. Зависимость суммарной мощности мобильного транспортного робота от радиуса поворота

Показано, что при определенных наборах параметров система с использованием воздушной подушки может быть менее энергоэффективна, чем классическая транспортная система (рисунок 10). Это характерно для систем небольшой площади, поскольку в данном случае требуется создавать и поддерживать более высокое давление в воздушной подушке, что приводит к большим утечкам. Системы большой площади с воздушной подушкой являются более энергоэффективными, чем классические решения (рисунок 11).

### **Объекты, (предмет) и методы исследования**

Объектом исследования в научно-квалификационной работе является мобильный транспортный робот на воздушной подушке. В качестве методов исследования используются методы на базе аналитической механики и компьютерного моделирования. Расчеты проводились при помощи программного математического пакета PTC MathCAD Prime и универсальной программной системы анализа методом конечных элементов ANSYS Workbench. Для построения схем и 3D моделей использовались программы КОМПАС-3D и SolidWorks.

### **Результаты и их обсуждение**

Основные результаты, полученные в работе, можно формулировать следующим образом:

1. Исследован процесс взаимодействия уплотнителя воздушной подушки мобильного транспортного робота с неровностями поверхности, по которой осуществляется движение. Показано, что при соотношении глубины условной неровности к ее периоду менее 5 использование прижимного уплотнения является нерациональным. При величине данного соотношения более 40 использование прижимного уплотнения является предпочтительным, поскольку

позволяет полностью перекрыть имеющиеся неровности, не создавая избыточной силы трения.

2. Применение мобильных транспортных роботов с воздушной подушкой круглой формы является наиболее предпочтительным с точки зрения энергоэффективности нагнетателя. При необходимости использования квадратной или прямоугольной формы предпочтение следует отдавать первой, поскольку во втором случае потребная мощность нагнетателя выше. Если же применение прямоугольной формы является единственно возможным, необходимо стремиться свести соотношение длины и ширины робота к единице.
3. При неизменных параметрах гарантированного зазора между уплотнителем и поверхностью, по которой происходит движение, а также постоянной массы транспортного робота и перевозимого груза изменение ее площади ведет к снижению мощности нагнетателя. При достижении критического значения дальнейшее увеличение площади воздушной подушки не приводит к существенному снижению потребной мощности нагнетателя. Для каждого конкретного набора параметров системы критическое значение является уникальным.
4. Снижение скорости перемещения мобильного транспортного робота при его неизменной площади позволяет снизить мощность, затрачиваемую на преодоление сил сопротивления, возникающих в зоне контакта уплотнителя воздушной подушки и поверхности, по которой происходит движение. При этом при малых площадях данная зависимость носит пропорциональный характер. С увеличением площади степень снижения мощности возрастает.

### **Заключение**

Можно подвести итоги исследований, проведенных в рамках научно-квалификационной работы:

1. Предложена классификация профилей неровностей покрытия и разработан подход к его моделированию.
2. Разработана и исследована математическая модель уплотнителя воздушной подушки мобильного робота для исследования зависимости утечек от конструктивных параметров при различных режимах работы.
3. Разработана и исследована математическая модель уплотнителя воздушной подушки мобильного робота для исследования зависимости величины сил трения от конструктивных параметров при различных режимах работы.
4. Разработана и исследована математическая модель уплотнителя воздушной подушки мобильного робота для исследования влияния его геометрии на силы и моменты сопротивления ее движению в различных режимах работы.
5. Разработана методика оптимизации конструктивных и эксплуатационных параметров робота по критерию минимизации потребляемой мощности и энергии.

Как видно, все поставленные задачи выполнены, а установленные цели достигнуты.

**Список работ, опубликованных по теме научно-квалификационной работы (диссертации)**

**Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК**

Нет

**Публикации в изданиях, индексируемых в базе Scopus**

Kozlovich A.V., Shabanov D.V., Volkov A.N. Research of resistance forces in the contact zone of the seal and the floor of a mobile robotic air cushion platform // Journal of Physics: Conference Series. Ser. "International Conference on IT in Business and Industry, ITBI 2021" 2021. С. 012081.

Kozlovich A.V., Kochneva O.V., Shabanov D.V., Valiev R.R. Autonomous wheeled mobile robot maneuvering in constraint environment. Trajectory tracking quality criteria // Journal of Physics: Conference Series. Ser. "International Conference on Innovations, Physical Studies and Digitalization in Mining Engineering, IPDME 2020" 2021. С. 012051.

Kozlovich A.V., Kochneva O.V., Podkolzina L.V., Shabanov D.V. Mobile robotic air cushion system // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 5th International Conference "Arctic: History and Modernity" 18-19 March 2020, Saint-Petersburg, Russia. Saint-Petersburg, 2020. С. 012119.

### **Публикации в изданиях, индексируемых в базе РИНЦ**

Волков А.Н., Жавнер В.Л., Козлович А.В., Кочнева О.В., Шабанов Д.В. Анализ компенсирующей способности воздушной подушки транспортного мобильного робота в зависимости от величины пятна контакта между уплотнением и плоскостью пола // Неделя науки СПбПУ. материалы научной конференции с международным участием. 2018. С. 17-19.

Волков А.Н., Козлович А.В., Кочнева О.В. Воздушная подушка выкатного поля стадиона "Газпром-Арена" // Неделя науки СПбПУ. Материалы научной конференции с международным участием. В 2-х частях. 2020. С. 12-14.

Козлович А.В. Силы сопротивления, возникающие при движении мобильной транспортной платформы на воздушной подушке // Современная техника и технологии в электроэнергетике и на транспорте: задачи, проблемы, решения. сборник трудов V Всероссийской (с международным участием) научно-практической конференции научных, научно-педагогических работников, аспирантов и студентов. Челябинск, 2021. С. 82-92.

Волков А.Н., Козлович А.В., Шабанов Д.В. Исследование сил сопротивления в зоне контакта уплотнения и пола мобильной роботизированной платформы на воздушной подушке // Инновации и

перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2021. Сборник тезисов VIII Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2021. С. 33-36.

### **Патенты**

Волков А.Н., Брунман В.Е., Козлович А.В., Постнов Р.В. Выдвижное футбольное поле для крытого стадиона // Патент на полезную модель RU 161988 U1, 20.05.2016. Заявка № 2015109303/12 от 17.03.2015.

Волков А.Н., Брунман В.Е., Козлович А.В., Постнов Р.В. ограждение платформы на воздушной подушке // Патент на полезную модель RU 162063 U1, 20.05.2016. Заявка № 2015118813/11 от 19.05.2015.

**Аспирант:**

  
\_\_\_\_\_

(подпись)

**Козлович А.В.**