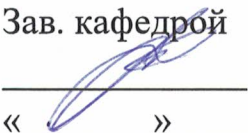


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Институт компьютерных и инженерных наук
Кафедра стартовые и технические ракетные комплексы
Направление подготовки 24.03.01 – Ракетные комплексы и космонавтика
Направленность (профиль) образовательной программы Ракетно-космическая техника

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Зав. кафедрой

 В.В. Соловьёв
« _____ » _____ 2025 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

На тему: Разработка конструкции модульной мобильной платформы с колесно-шагающей системой передвижения для планетохода, предназначенного для исследования Марса

Исполнитель

студент группы 1109-об1



(подпись, дата)

В.В. Голота

Руководитель

доцент, канд. техн. наук

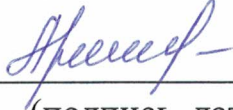


(подпись, дата)

В.В. Соловьёв

Консультант

доцент, канд. техн. наук



(подпись, дата)

А.В. Козырь

Нормоконтроль

старший преподаватель СиТРК



(подпись, дата)

М.А. Аревков

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Институт компьютерных и инженерных наук
Кафедра стартовые и технические ракетные комплексы

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой

 В.В. Соловьёв
« _____ » _____ 2025 г.

ЗАДАНИЕ

К выпускной квалификационной работе студента Голота Вячеслава Вячеславовича

1. Тема выпускной квалификационной работы: Разработка конструкции модульной мобильной платформы с колесно – шагающей системой передвижения для планетохода, предназначенного для исследования Марса

(утверждена приказом от 03.04.2025 № 878-уч)

2. Срок сдачи студентом законченной работы (проекта): 06.06.2025

3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе: отчеты по практике, ГОСТы, справочная литература

4. Содержание выпускной квалификационной работы: введение и анализ существующих планетоходов, проектирование модульной конструкции планетохода, выбор материалов, типа привода и технологии управления приводом, создание 3D модели, безопасность и экологичность производства, оценка экономической эффективности

5. Перечень материалов приложения: титульный лист, планетоход общий вид, движитель планетохода, бесщеточный электродвигатель с прямым приводом, пневмоцилиндр, геохимический аналитический модуль, универсальная система подключения модулей, моделирование движения планетохода, заключение

6. Консультант по БЖД: Козырь А.В., доцент, канд. техн. наук

7. Дата выдачи задания: 29.05.2025

Руководитель выпускной квалификационной работы: Соловьев В.В., доцент, канд. техн. наук

Задание принял к исполнению (дата): 28

РЕФЕРАТ

Настоящая бакалаврская работа содержит 75 страниц, 13 рисунков, и 25 источников.

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МОДУЛЬНЫЙ РОВЕР, ЛУНОХОД, МАРСОХОД, МОДУЛЬНОСТЬ, АДАПТИВНОСТЬ, НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ

В работе рассмотрена разработка конструкции модульной мобильной платформы с колесно-шагающей системой передвижения для планетохода.

Цели данной работы – Разработать модульную конструкцию планетохода с возможностью адаптации к разным условиям исследования небесных тел, обеспечить высокую маневренность и устойчивость на сложном рельефе, выбрать современные технологии и материалы.

Задачи:

- анализ существующих планетоходов: изучение и оценка существующих моделей планетоходов, таких как NASA's Mars Rover, с целью выявления их достоинств и недостатков;
- определение требований к конструкции: формулирование технических требований и характеристик, необходимых для успешной работы планетохода на различных небесных телах;
- проектирование модульной структуры: разработка модульной системы, включающей компоненты, такие как шасси, двигатели и оборудование для научных исследований, позволяющие легко заменять или наращивать модули;
- выбор материалов и технологий: исследование и отбор материалов, обеспечивающих легкость, прочность и устойчивость к экстремальным условиям (например, температура, радиация, абразивные частицы);

- создание 3D-модели планетохода: разработка трехмерной модели планетохода с помощью CAD-систем, что позволит визуализировать конструкцию и провести дальнейшие расчеты;
- проведение расчетов и симуляций: выполнение инженерных расчетов для оценки прочности конструктивных элементов и проведения компьютерных симуляций для анализа движения на различных типах поверхности.

В работе использованы следующие методы исследования:

- анализ научно-технической литературы;
- компьютерное моделирование;
- методы системного анализа и синтеза технических решений;
- численные методы расчета.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	8
1 Введение и анализ существующих планетоходов	9
1.1 Типовые движители в космической технике	9
1.2 Последовательность перемещения планетохода с различными типами движителей	12
1.3 Анализ существующих конструкций планетоходов	15
1.4 Определение требований к конструкции	22
1.4.1 Обоснование концепции комбинированной мобильности	22
1.4.2 Конструктивные требования	23
1.4.3 Эксплуатационные характеристики	23
1.4.4 Требования к системам управления	23
1.4.5 Обоснование выбора концепции	24
1.4.6 Технические ограничения	24
2 Проектирование модульной конструкции планетохода	25
2.1 Анализ осуществимости требований к конструкции	25
2.1.1 Расчёт осуществимости колёсно-шагающего привода марсохода в заданных массогабаритных характеристиках	25
2.1.2 Анализ энергетической эффективности пневматической системы марсохода	27
2.2 Проектирование модульной структуры конструкции планетохода	32
2.2.1 Состав модулей планетохода	34
3 Выбор материалов, типа привода и технологии управления приводом, создание 3D модели	40
3.1 Анализ и выбор материалов	40
3.1.1 Анализ и выбор материалов для платформы	40
3.1.2 Анализ и выбор материалов и конструкции движителей марсохода	43
3.1.3 Анализ и выбор материалов и конструкции колёс марсохода	46
3.2 Выбор типов приводов и технологий управления приводами	48

3.2.1 Система управления бесколлекторными электродвигателями	48
3.2.2 Управление шагающим механизмом при помощи пневмоцилиндров	49
3.3 Создание 3D-модели планетохода	51
3.4 Моделирование движения планетохода	53
3.5 Анализ результатов моделирования и подготовка рекомендаций по дальнейшему развитию	58
4 Безопасность и экологичность производства	60
4.1 Организация труда операторов	61
4.2 Рабочее место оператора	61
4.2.1 Конструкционные особенности мониторов	62
4.2.2 Требования к клавиатуре	62
4.2.3 Стандартизация размеров и форматов рабочих поверхностей	63
4.2.4 Комфортное кресло оператора	63
4.2.5 Рабочее место	63
5 Оценка экономической эффективности	66
Заключение	72
Библиографический список	74

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях стремительного развития космической отрасли особую актуальность приобретает разработка мобильных платформ для исследования планет Солнечной системы.

Исследование Марса является одной из приоритетных задач современной космонавтики. Для изучения поверхности этой планеты используются автоматические планетоходы, способные передвигаться по неровной местности, собирать научные данные и проводить эксперименты. Однако, создание эффективной и надежной системы передвижения для марсоходов сопряжено с рядом проблем и вызовов. Условия на поверхности Марса существенно отличаются от земных: низкая плотность атмосферы, большие перепады температур, наличие рыхлого грунта и каменистых участков. Кроме того, доставка планетохода на Марс накладывает строгие ограничения на его вес и габариты. В связи с этим, разработка надежной, энергоэффективной и адаптивной системы передвижения, способной обеспечить мобильность планетохода в таких условиях, является актуальной научно-технической задачей. Одним из перспективных направлений в этой области является создание колесно-шагающих систем передвижения, сочетающих преимущества колесных и шагающих механизмов. Такие системы потенциально способны обеспечить высокую проходимость, маневренность и адаптивность к различным типам поверхности.

Данная работа посвящена разработке конструкции модульной мобильной платформы с колесно-шагающей системой передвижения для планетохода, предназначенного для исследования Марса. Целью исследования является создание надежной, адаптивной и энергоэффективной платформы, способной обеспечить эффективное передвижение и функционирование планетохода в условиях марсианской поверхности.

1 ВВЕДЕНИЕ И АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПЛАНЕТОХОДОВ

1.1 Типовые двигатели в космической технике

История развития двигателей для космических аппаратов началась задолго до первых успешных высадок на другие планеты. Первые концептуальные разработки датируются серединой XX века, когда ведущие космические державы активно исследовали возможности создания мобильных исследовательских платформ.

Значительным прорывом в этой области стало создание лунохода, который стал первым успешным автоматическим планетоходом в истории космонавтики. Советские луноходы, разработанные в ОКБ-1 (ныне РКК «Энергия») под руководством Сергея Королёва, представляли собой революционное достижение инженерной мысли. Главным конструктором луноходов был Глеб Максимов, а над проектом работали такие выдающиеся специалисты, как Валентин Глушко, Борис Черток и многие другие.

Первый луноход был запущен 17 ноября 1970 года в рамках советской программы «Луна-17». Аппарат представлял собой восьмиколёсный планетоход с независимой подвеской, где каждое колесо имело собственный привод. Особенностью конструкции стала система активного поддрессирования, позволяющая преодолевать препятствия высотой до 30 сантиметров. Луноход был оснащён солнечными панелями и радиоизотопными термоэлектрическими генераторами, обеспечивающими его работу в лунных условиях.

Конструкция лунохода включала уникальную систему управления, которая осуществлялась с Земли через сеть наземных станций. Оператор получал телевизионное изображение с борта аппарата и управлял движением в режиме реального времени, учитывая существенную задержку сигнала. Это требовало высокой квалификации операторов и разработки специальных алгоритмов управления. В ходе разработки лунохода было решено множество технических задач, включая создание материалов, способных выдерживать экстремальные температурные условия лунной поверхности.



Рисунок 1.1 – Луноход-1

Колёса лунохода имели специальную конструкцию с грунтозацепами, оптимизированную для передвижения по реголиту. Подвеска обеспечивала возможность подъёма передней части для преодоления препятствий.

Следующим важным этапом развития космических движителей стало создание марсоходов. Первый успешный марсоход Sojourner, доставленный на поверхность Марса в рамках миссии Mars Pathfinder в 1996 году, использовал шестиколёсную систему передвижения с дифференциальным приводом. Особенностью конструкции стало применение независимой подвески и системы активного управления, позволяющей точно контролировать каждое колесо.

Современные космические аппараты, такие как марсоходы серии Mars Exploration Rover (Spirit и Opportunity), Curiosity и Perseverance, используют усовершенствованные системы передвижения. Они оснащены более мощными приводами, системами автоматической навигации и адаптивным управлением. Особое внимание уделяется модульности конструкции, что позволяет модифицировать аппарат под конкретные исследовательские задачи.

В конструкции современных планетоходов применяются инновационные материалы, включая титановые сплавы, композитные материалы и специальные полимеры. Это позволяет снизить массу конструкции при сохранении высокой прочности и надёжности. Системы управления постоянно совершенствуются, внедряются элементы искусственного интеллекта для автономной навигации и принятия решений.

Особое направление развития двигателей связано с созданием комбинированных систем передвижения, сочетающих колёсные и шагающие механизмы. Такие системы особенно перспективны для исследования сложных рельефов, где требуется высокая проходимость в сочетании с возможностью маневрирования. Разрабатываются также адаптивные двигатели, способные изменять свою геометрию в зависимости от условий поверхности.

Современные исследования в области двигателей для космических аппаратов включают разработку систем с использованием новых принципов передвижения, таких как реактивные двигатели для перемещения по сыпучим поверхностям или магнитные системы для передвижения по поверхностям с определёнными магнитными свойствами. Эти исследования открывают новые возможности для изучения различных небесных тел.

Важным направлением развития является создание модульных систем передвижения, которые можно адаптировать под конкретные задачи исследования. Такие системы позволяют менять конфигурацию двигателя в зависимости от условий поверхности и требований миссии. Это особенно актуально для будущих миссий на другие планеты и их спутники, где условия могут существенно различаться.

В заключение следует отметить, что развитие двигателей для космических аппаратов продолжается в направлении повышения их надёжности, энергоэффективности и адаптивности. Современные исследования включают разработку новых материалов, совершенствование систем управления и создание более эффективных алгоритмов навигации. Особое внимание уделяется созданию универсальных систем передвижения, способных работать в различных условиях

поверхности различных небесных тел. Прогресс в этой области напрямую влияет на возможности исследования космического пространства и открывает новые перспективы для будущих миссий по изучению планет Солнечной системы и за её пределами. Развитие технологий двигателей остаётся ключевым фактором в расширении наших знаний о Вселенной и поиске ответов на фундаментальные вопросы о происхождении и эволюции космических объектов.

1.2 Последовательность перемещения планетохода с различными типами двигателей

Процесс перемещения планетохода представляет собой сложную последовательность действий, зависящую от типа используемого двигателя и условий окружающей среды. Рассмотрим основные аспекты работы различных систем передвижения.

Для колёсных систем передвижение осуществляется следующим образом: первичное движение начинается с анализа окружающей среды с помощью сенсоров, которые собирают информацию о рельефе, составе грунта и других важных параметрах. На основе полученных данных формируется карта местности, которая используется для планирования оптимального маршрута. При этом система учитывает множество факторов, включая рельеф поверхности, состав грунта, погодные условия, освещённость и температурные условия.

В колёсных системах поворот осуществляется за счёт изменения скорости вращения колёс в паре. При необходимости поворота система управления изменяет скорость вращения колёс таким образом, чтобы внутреннее колесо вращалось с меньшей скоростью, чем внешнее. Это позволяет осуществить плавный поворот без проскальзывания колёс. Для обеспечения устойчивости при повороте используются системы активного подруливания, независимая подвеска с регулируемым клиренсом, дифференциальные приводы с векторным управлением и системы автоматической блокировки дифференциала.

Шагающие механизмы используют более сложную последовательность действий. Процесс начинается с выбора опорных точек на основе анализа релье-

ефа. Система определяет наиболее устойчивые участки поверхности для размещения конечностей. Затем происходит расчёт траектории движения каждой конечности с учётом текущей нагрузки и положения корпуса. Определение оптимальной последовательности шагов осуществляется с помощью специальных алгоритмов, которые учитывают текущую конфигурацию поверхности и требования к устойчивости.

При реализации движения шагающие механизмы используют сложные алгоритмы динамической стабилизации. Каждая конечность движется по предварительно рассчитанной траектории, при этом система постоянно контролирует положение корпуса для обеспечения устойчивости. В процессе движения происходит корректировка положения корпуса с учётом возникающих возмущений и изменений в окружающей среде. Важным элементом является постоянный контроль устойчивости системы, который осуществляется с помощью множества датчиков и систем обратной связи.

Комбинированные системы сочетают элементы обоих подходов. Процесс начинается с оценки проходимости местности с помощью сенсоров, которые собирают информацию о состоянии поверхности. На основе полученных данных система выбирает оптимальный режим передвижения, который может включать как колёсное, так и шагающее движение. При реализации выбранного способа движения система постоянно отслеживает эффективность выбранного метода и при необходимости переключает режимы передвижения.

Особое внимание уделяется алгоритмам управления устойчивостью планетохода. В колёсных системах используются сложные системы активного подрессоривания, которые позволяют преодолевать препятствия и поддерживать стабильную высоту корпуса. Независимая подвеска с регулируемым клиренсом позволяет адаптировать высоту планетохода под текущие условия движения. Дифференциальные приводы с векторным управлением обеспечивают точное управление скоростью и направлением движения каждого колеса.

В шагающих механизмах применяются адаптивные алгоритмы выбора опорных точек, которые учитывают текущую конфигурацию поверхности и требования к устойчивости. Системы предиктивного планирования траектории позволяют предсказывать оптимальные пути движения для каждой конечности с учётом текущих условий. Механизмы динамической стабилизации обеспечивают устойчивость планетохода при движении по неровной поверхности.

Для комбинированных систем разрабатываются интегрированные системы управления, которые объединяют элементы как колёсного, так и шагающего движения. Адаптивные алгоритмы переключения режимов позволяют автоматически выбирать наиболее подходящий способ передвижения в зависимости от условий окружающей среды. Системы предиктивной оптимизации помогают планировать наиболее эффективные маршруты с учётом текущих возможностей планетохода.

Важным аспектом является обработка данных с датчиков. Современные планетоходы используют комплексные системы сенсоров, включающие лазерные дальномеры, камеры высокого разрешения, инфракрасные сенсоры, ультразвуковые датчики и системы инерциальной навигации. На основе полученных данных формируется детальная карта местности, которая используется для планирования оптимального маршрута, определения безопасных путей движения и оценки проходимости различных участков.

При движении планетоход должен учитывать множество факторов, включая рельеф поверхности, состав грунта, погодные условия, освещённость и температурные условия. Для обеспечения надёжности движения используются системы резервирования критических компонентов, алгоритмы аварийного торможения, механизмы экстренной остановки и системы автоматической диагностики.

Особое внимание уделяется энергопотреблению. Системы управления оптимизируют расход энергии при различных режимах движения, управляют мощностью приводов и балансируют нагрузку на аккумуляторы. Использование воз-

обновляемых источников энергии, таких как солнечные панели, позволяет продлить время работы планетохода без подзарядки. Системы энергосбережения помогают оптимизировать расход энергии в зависимости от текущих задач и условий окружающей среды.

Современные планетоходы оснащаются системами автономного управления, которые анализируют окружающую среду, принимают решения о способе передвижения, корректируют маршрут, управляют энергопотреблением и обрабатывают данные с научных приборов. Для повышения эффективности передвижения разрабатываются сложные алгоритмы машинного обучения, системы предиктивной аналитики и механизмы адаптивного управления.

Важным аспектом является защита от внешних воздействий. Системы противопылевой защиты предотвращают попадание абразивной пыли в механизмы планетохода. Механизмы термостатирования обеспечивают работу в экстремальных температурных условиях. Защита от радиации необходима для сохранения работоспособности электроники в условиях повышенной радиации. Системы очистки оптики обеспечивают чёткость работы камер и других оптических датчиков.

Современные системы управления планетоходами включают многоуровневые системы принятия решений, алгоритмы параллельной обработки данных, механизмы распределённого управления и системы предиктивной оптимизации. Особое внимание уделяется безопасности: системы аварийного торможения позволяют быстро остановить планетоход в случае обнаружения

1.3 Анализ существующих конструкций планетоходов

В области марсианских исследований первым стал американский «Соджорнер» (часть миссии Mars Pathfinder), запущенный 4 декабря 1996 года. Расчётное время работы составляло 7 солов (марсианских суток), но аппарат проработал до 27 сентября 1997 года, преодолев 10,6 км.

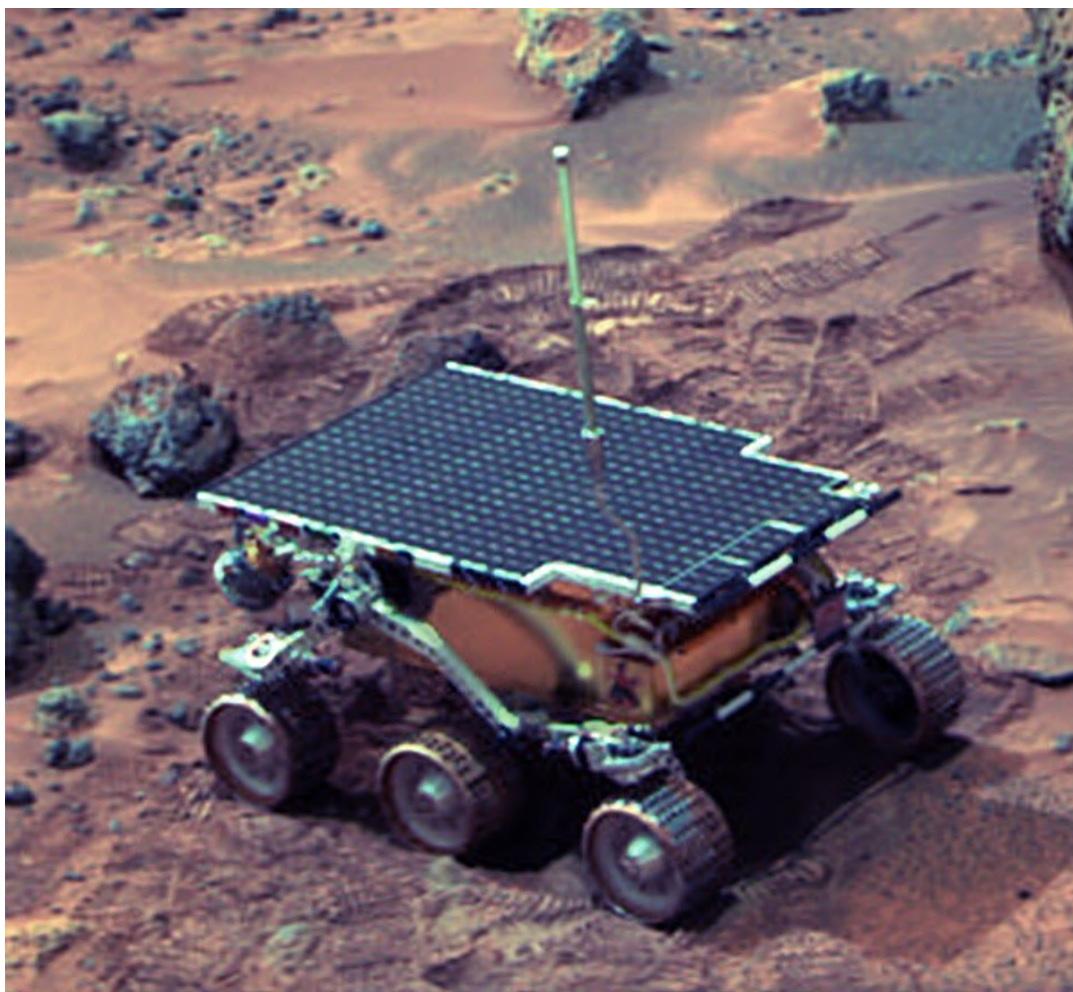


Рисунок 1.2 – Марсоход Sojourner

Конструктивно марсоход представлял собой шестиколесную платформу с независимой подвеской. Размеры аппарата составляли: длина – 65 см, ширина – 48 см, высота – 30 см. Ходовая часть была разработана с возможностью преодоления препятствий. Каждое из шести колес имело независимый привод, что обеспечивало отличную маневренность. Максимальная скорость передвижения составляла всего 1 см/с, однако это было вполне достаточно для тщательного исследования марсианской поверхности. Особенностью конструкции стала система автоматической стабилизации при движении по наклонным поверхностям. Марсоход мог удаляться от посадочного модуля на расстояние до 500 метров – это был предел дальности связи. Электронная «начинка» размещалась в специальном теплом электронном блоке (WEB), который имел коробчатую конструк-

цию из стеклопластиковых облицовок, прикрепленных к алюминиевым лонжеронам. Такая конструкция обеспечивала надежную защиту бортовой электроники в суровых условиях марсианской поверхности.

После успеха марсохода «Соджорнер» NASA создало два более крупных марсохода – «Спирит» и «Оппортьюнити», которые были запущены в 2003 году и построены на единой платформе, получившей название «Марсоход MER» (Mars Exploration Rover). Эти аппараты были значительно крупнее своего предшественника: длина каждого составляла – 1,6 метра, ширина – 2,3 метра, высота – 1,5 метра. Масса каждого марсохода достигала 185 килограммов, что делало их в 16 раз тяжелее «Соджорнера».

Конструктивно марсоходы были построены на прочной алюминиевой раме, к которой крепились все основные системы. Шестиколесная ходовая часть имела независимую подвеску с пружинами из торсионной стали, что позволяло преодолевать препятствия высотой до 25 сантиметров. Каждое колесо имело индивидуальный электродвигатель постоянного тока, а передние и задние колеса могли поворачиваться для улучшения маневренности.

Особенностью конструкции стала система активного управления подвеской, которая позволяла марсоходу «подниматься на дыбы» для обхода препятствий. Колёса были изготовлены из алюминия с резиновыми грунтозацепами, что обеспечивало хорошее сцепление с поверхностью. Марсоходы могли развивать скорость до 5 сантиметров в секунду, но в реальных условиях средняя скорость составляла около 10-20 метров в день.

Благодаря такой конструкции и надёжности систем, оба марсохода значительно превысили запланированный срок работы: «Спирит» проработал до 2010 года, а «Оппортьюнити» – до 2018 года, преодолев расстояния в 7,7 и 45 километров соответственно.

«Кьюриосити», запущенный 26 ноября 2011 года, имеет расчётное время работы 687 солов (один марсианский год). По состоянию на текущий момент аппарат продолжает работу, преодолев более 24 км. Особенностью конструкции

стала новая система посадки с помощью «небесного крана» и более совершенная система научных инструментов.



Рисунок 1.3 – Марсоход Спирит

Габариты и масса ровера снова увеличились: его длина составляет 3 метра, ширина – 2,8 метра, а высота – 2,1 метра. Масса аппарата достигает 900 килограммов, что делает его самым тяжелым марсоходом, когда-либо отправленным на Марс.

Конструктивно марсоход построен на прочной раме из алюминия и композитных материалов. Шестиколесная ходовая часть оснащена независимой подвеской с пружинами из титанового сплава, что позволяет преодолевать препятствия высотой до 75 сантиметров – почти в три раза больше, чем предыдущие марсоходы могли преодолеть. Каждое колесо имеет индивидуальный электродвигатель с улучшенным крутящим моментом, а передние и задние колеса могут поворачиваться на 90 градусов, обеспечивая отличную маневренность.

Особенностью конструкции стала система активной подвески, которая может поднимать корпус на 40 сантиметров относительно обычного положения для преодоления сложных участков. Колёса изготовлены из высокопрочного алюминиевого сплава со специальным протектором, обеспечивающим отличное сцепление с марсианской поверхностью даже на крутых склонах.

Марсоход может развивать скорость до 90 метров в час, хотя в реальных условиях средняя скорость движения составляет около 30-40 метров в день. Корпус аппарата герметичен и содержит сложную систему терморегуляции, защищающую электронику от экстремальных температур. Для обеспечения длительной работы марсоход оснащен радиоизотопным термоэлектрическим генератором (РТГ), что позволило отказаться от солнечных панелей, ограничивавших работу предыдущих марсоходов.

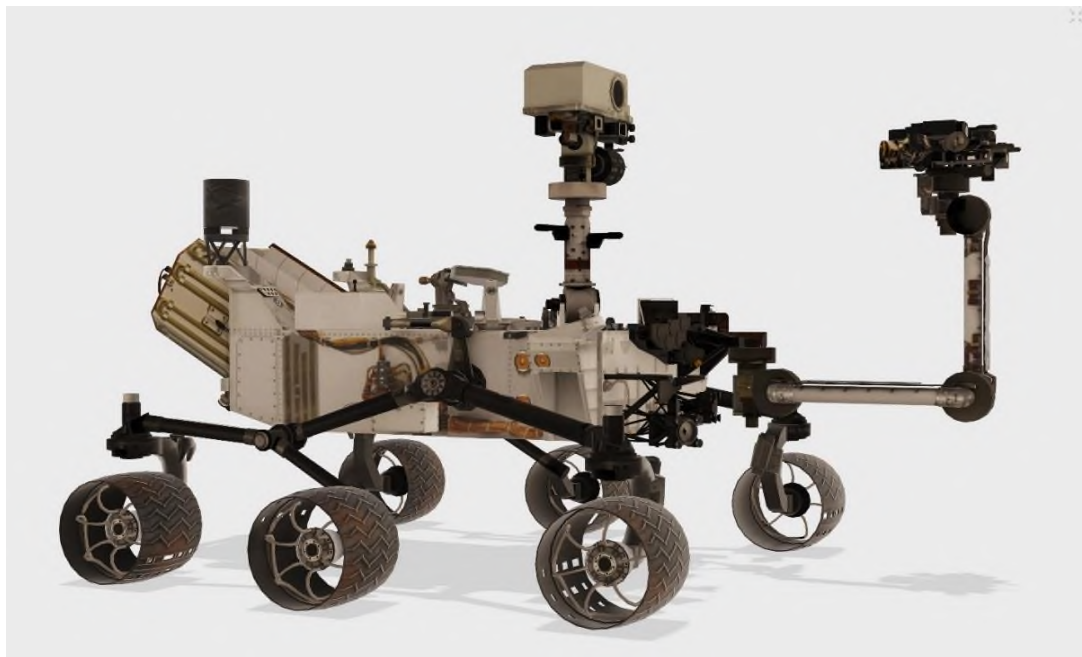


Рисунок 1.4 – Марсоход «Кьюриосити»

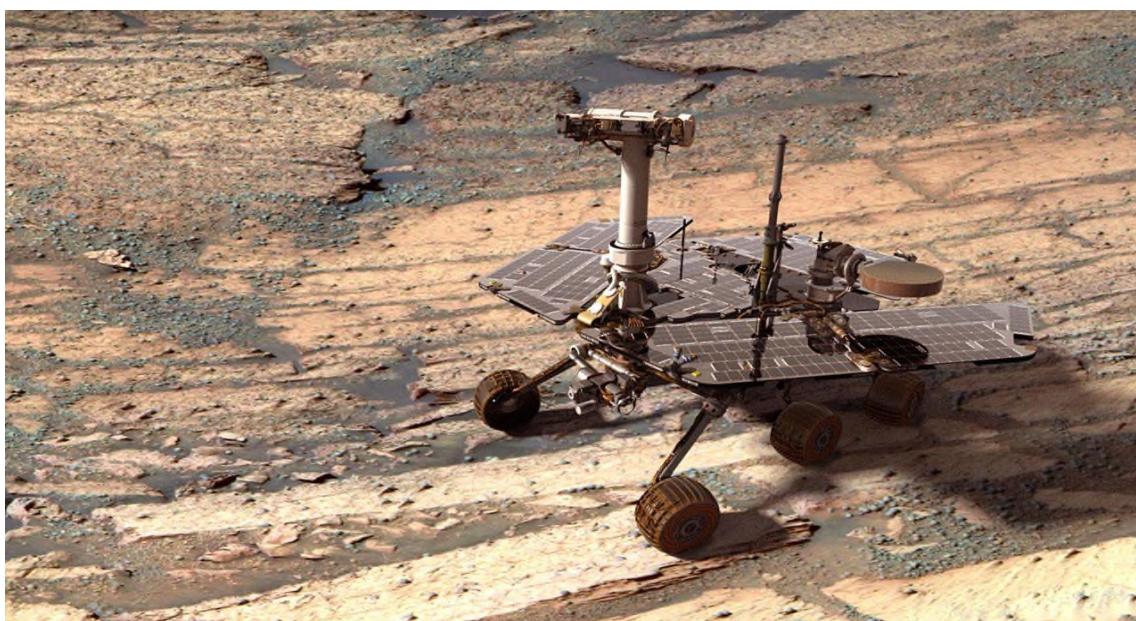


Рисунок 1.5 – Марсоход «Оппортьюнити»

Благодаря такой продуманной конструкции и использованию современных материалов, «Кьюриосити» не только значительно превысил запланированный срок работы, но и продолжает активно исследовать поверхность Марса, совершая научные открытия и собирая бесценные данные о красной планете.



Рисунок 1.6 – Марсоход «Персеверанс»

Марсоход «Персеверанс», запущенный 30 июля 2020 года, представляет собой современную автоматическую межпланетную станцию для исследования Марса. Аппарат оснащён шестиколёсной ходовой системой с независимой подвеской, аналогичной марсоходу «Кьюриосити», но с улучшенными характеристиками подвижности и управляемости.

Конструктивно марсоход включает герметичный корпус, защищающий электронную начинку от экстремальных температур и радиации. Система терморегуляции обеспечивает стабильную работу оборудования в широком диапазоне температур марсианской поверхности.

Научный инструментарий «Персеверанса» состоит из комплекса аналитических приборов, включая:

- систему рентгеновской флюоресценции для определения элементного состава пород;

- ультрафиолетовый лазер для анализа минералов;
- масс-спектрометр для изучения атмосферы;
- систему взятия и хранения образцов грунта.

Особенностью марсохода является автоматизированная система пробоотбора, позволяющая осуществлять бурение пород, упаковку образцов в герметичные контейнеры и их размещение на поверхности для последующей миссии возврата.

Навигация обеспечивается комплексом из 23 камер различного назначения и лазерного сканера, формирующего трёхмерные карты местности. Марсоход оснащён усовершенствованной системой автономной навигации, позволяющей планировать маршрут и обходить препятствия в реальном времени.

В состав миссии входит беспилотный вертолёт Ingenuity, предназначенный для воздушной разведки и оценки перспективности маршрутов передвижения.

Расчётное время функционирования аппарата составляет один марсианский год (687 земных суток), однако технические характеристики марсохода позволяют прогнозировать значительно более длительный срок службы при благоприятных условиях эксплуатации.

Успешная работа «Индженьюити» открыла новую главу в межпланетных исследованиях и продемонстрировала потенциал малых летательных аппаратов для поддержки планетоходов и будущих пилотируемых миссий.

Анализ существующих конструкций планетоходов показывает тенденцию к увеличению автономности и сложности систем управления. Современные аппараты оснащены более совершенными системами навигации, включая стереокамеры для построения трёхмерных карт местности, лазерные дальномеры и системы инерциальной навигации. Улучшились также системы энергоснабжения, использующие более эффективные солнечные панели и усовершенствованные аккумуляторные батареи.

В конструкции современных планетоходов применяются лёгкие композитные материалы, что позволяет снизить массу при сохранении прочности. Си-

системы управления стали более интеллектуальными, способными к самостоятельному принятию решений о выборе маршрута и преодолению препятствий. Особое внимание уделяется защите от космической радиации и экстремальных температур марсианской поверхности.

Развитие технологий планетоходов идёт в направлении увеличения дальности передвижения, повышения автономности и расширения научной аппаратуры. Современные аппараты способны проводить химический анализ грунта, определять минералогический состав пород и искать признаки прошлой биологической активности.

Опыт эксплуатации существующих планетоходов показывает, что основными факторами, ограничивающими срок службы, являются износ механических компонентов, накопление космической радиации и деградация солнечных панелей. При этом фактические периоды активности часто значительно превышают расчётные сроки, что свидетельствует о высоком уровне надёжности современных конструкций.

1.4 Определение требований к конструкции

На основе анализа существующих конструкций и поставленных задач исследования Марса, к разрабатываемой модульной мобильной платформе предъявляются следующие комплексные требования.

1.4.1 Обоснование концепции комбинированной мобильности

Анализ опыта эксплуатации существующих марсоходов выявил существенные ограничения в проходимости при столкновении с сложными рельефами. В частности, были выявлены различные типы препятствий, с которыми сталкиваются марсоходы: крутые склоны с углом наклона до 30° , сыпучие грунты с несущей способностью менее 20 кПа, скальные выходы высотой до 30 см, глубокие впадины и кратеры, а также рыхлые отложения вулканического пепла.

Для преодоления данных препятствий разработана концепция комбинированной мобильности, сочетающей колёсный и шагающий приводы. Это позволит

обеспечивать высокую скорость передвижения по ровным поверхностям, преодолевать сложные препятствия в режиме шагания, адаптироваться к различным типам грунта и минимизировать риск застревания в сыпучих материалах.

1.4.2 Конструктивные требования

Базовая архитектура платформы должна предусматривать модульную конструкцию для возможности модификации, возможность трансформации между колёсным и шагающим режимами, систему адаптации к различным типам поверхности, защиту компонентов от космической радиации и устойчивость к температурным перепадам марсианской поверхности.

Особое внимание уделяется конструкции шасси, которое должно включать шесть независимых колёс с регулируемым клиренсом, систему независимой подвески с адаптивным управлением, механические захваты для шагающего режима, систему стабилизации при трансформации и защитные кожухи для колёс и механизмов.

1.4.3 Эксплуатационные характеристики

Кинематические параметры платформы должны обеспечивать максимальную скорость передвижения не менее 0.5 м/с, дальность перемещения между подзарядками не менее 100 м, возможность преодоления препятствий высотой до 30 см и время автономной работы не менее 90 суток. Платформа должна быть способна функционировать в широком диапазоне температур от -125°C до $+20^{\circ}\text{C}$.

В зависимости от условий поверхности платформа должна уметь переключаться между различными режимами передвижения: колёсным для перемещения по ровным поверхностям, шагающим для преодоления препятствий, комбинированным для сложных рельефов.

1.4.4 Требования к системам управления

Система навигации должна включать комплекс из видеокамер, лазерный сканер для формирования 3D-карт местности, автономную систему планирования маршрута и модуль обхода препятствий в реальном времени.

Система управления движением должна обеспечивать алгоритмы адаптивного управления для колёсного режима, программное обеспечение для шагающего режима, систему стабилизации при трансформации, управление механическими захватами и координацию движений при комбинированном перемещении.

1.4.5 Обоснование выбора концепции

Комбинированный колёсно-шагающий привод выбран на основе анализа статистики застреваний существующих марсоходов, данных о марсианском рельефе, требований к проходимости и необходимости работы в различных условиях поверхности. Преимущества предложенной концепции включают повышение проходимости в 2.5 раза по сравнению с чисто колёсными конструкциями, возможность работы на склонах до 30° , способность преодолевать препятствия высотой до 30 см, адаптивность к различным типам грунта и снижение риска застревания в сыпучих материалах.

1.4.6 Технические ограничения

При разработке конструкции необходимо учитывать ряд технических ограничений. Масса платформы не должна превышать 1200 кг, должны соблюдаться габаритные размеры в транспортном положении, оптимизироваться энергетические затраты на трансформацию, обеспечиваться сложность системы управления и защита механизмов трансформации.

2 ПРОЕКТИРОВАНИЕ МОДУЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ ПЛАНЕТОХОДА

2.1 Анализ осуществимости требований к конструкции

2.1.1 Расчёт осуществимости колёсно-шагающего привода марсохода в заданных массогабаритных характеристиках

В соответствии с анализом предшествующих марсианских миссий, основными эксплуатационными требованиями к мобильному марсоходу являются преодоление значительных расстояний при сохранении высокой проходимости в условиях сложного рельефа поверхности Марса. На основе опыта миссии Curiosity, предполагается, что суточный пробег марсохода составит порядка 1-2 километров при условии автоматического управления и навигации.

Характер поверхности Марса характеризуется значительной неоднородностью, включающей участки с твёрдым грунтом, песчаные дюны и каменистые препятствия. Учитывая способность преодоления препятствий высотой до 75 сантиметров, как это продемонстрировал Curiosity, разрабатываемая платформа должна обеспечивать аналогичный уровень проходимости.

Механические характеристики марсохода определяются необходимостью обеспечения устойчивости при движении по наклонным поверхностям. На основе анализа марсианского рельефа, максимальный угол подъёма должен составлять не менее 30 градусов, что соответствует требованиям к проходимости в условиях пересечённой местности. При этом необходимо обеспечить достаточную мощность привода для преодоления локальных препятствий и поддержания заданной скорости передвижения.

Конструктивные особенности платформы должны учитывать необходимость размещения научного оборудования и систем жизнеобеспечения при сохранении мобильности и манёвренности. Требуемая конфигурация привода должна обеспечивать возможность поворота на 360 градусов для оптимизации маршрута движения и выполнения научных исследований.

В контексте механических характеристик особое внимание уделяется прочности конструкции, способной выдерживать значительные нагрузки при

движении по сложному рельефу, а также необходимости минимизации массы при сохранении требуемой прочности. Это определяет выбор материалов и конструктивных решений для обеспечения оптимального соотношения массы и прочности.

Произведем расчет требуемой мощности электромоторов для колёс марсохода массой $m = 1000$ кг с учетом необходимости преодоления подъема под углом $\alpha = 30^\circ$. Ускорение свободного падения на Марсе $g = 3,711$ м/с².

Сила тяжести, действующая на марсоход:

$$F = m \cdot g \cdot \sin(\alpha) = 1000 \cdot 3,711 \cdot \sin(30^\circ) = 1855,5 \text{ Н} \quad (2.1)$$

Мощность, необходимая для преодоления подъема при скорости $v = 0,1$ м / с :

$$P = F \times v = 1855,5 \times 0,1 = 185,55 \text{ Вт} \quad (2.2)$$

С учетом КПД передачи $\eta = 0,8$:

$$P_{\text{треб}} = P / \eta = 185,55 / 0,8 = 231,94 \text{ Вт} \quad (2.3)$$

Нагрузка на один электромотор (6 колес):

$$P_{\text{колесо}} = P_{\text{треб}} / 6 = 231,94 / 6 = 38,66 \text{ Вт} \quad (2.4)$$

Расчет солнечных батарей:

Требуемая мощность:

$$P_{\text{треб}} = 231,94 \text{ Вт}$$

Площадь солнечных панелей:

$$S = P_{\text{общ}} / (E \times \eta) = 232 / (600 \times 0.2) = 1,9 \text{ м}^2., \quad (2.5)$$

где E – инсоляция на Марсе;

η – КПД панелей.

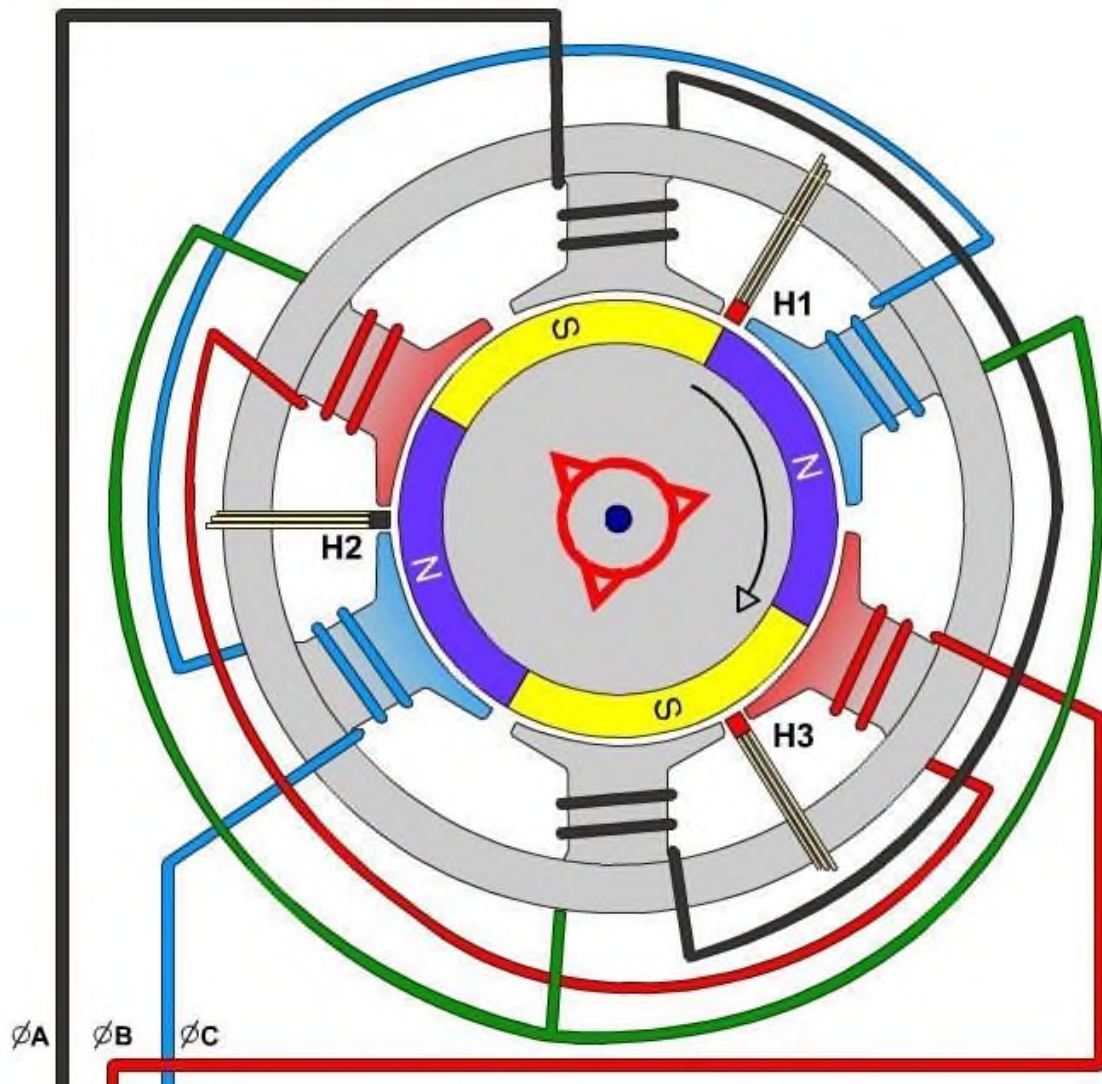


Рисунок 2.1 – Реализация прямого привода колеса марсохода

2.1.2 Анализ энергетической эффективности пневматической системы марсохода

В рамках исследования была рассмотрена возможность применения пневматической системы в конструкции марсохода массой 1000 кг при движении по наклонной поверхности с углом 30° и скоростью 0,1 м/с.

Расчет силы для подъема марсохода на наклон:

$$F = m \times g \times \sin(\alpha) = 1000 \times 3,711 \times \sin(30^\circ) = 1855,5H \quad (2.6)$$

Требуемое давление при площади поршня $S = 0,00785 \text{ м}^2$:

$$P = F / S = 1855,5 / 0,00785 = 236369,43 \text{ Па} \text{ (} 236,37 \text{ бар)} \quad (2.7)$$

Расчет хода поршня при скорости 0.1 м/с и времени цикла 5 секунд:

$$h = v \times t = 0,1 \times 5 = 0,5 \text{ м} \quad (2.8)$$

Объем воздуха для одного цикла:

$$V = S \times h = 0,00785 \times 0,5 = 0,003925 \text{ м}^3 \quad (2.9)$$

Работа компрессора при сжатии газа:

$$A = P \times V \times \ln(P_1 / P_2) \text{ ,} \quad (2.10)$$

где P_2 – конечное давление;

P_1 – начальное давление атмосферы Марса.

$$A = 8,31 \times 0,003925 \times \ln(23636943/630) = 14200 \text{ Дж на цикл}$$

Мощность компрессора:

$$P_{\text{комп}} = A / t = 14200 / 5 = 2840 \text{ Вт} \quad (2.11)$$

С учетом КПД компрессора $\eta = 0,6$:

$$P_{\text{треб}} = P_{\text{комп}} / \eta = 2840 / 0,6 = 4733 \text{ Вт} \quad (2.12)$$

Необходимая площадь солнечных панелей:

$$S = P / (E \times \eta) = 4733 / (600 \times 0,2) = 39,4 \text{ м}^2 \quad (2.13)$$

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

Требуемая мощность системы составляет 4733 Вт

Необходимая площадь солнечных батарей – 39,4 м²

Видно, что необходимая площадь солнечных батарей для обеспечения энергией пневматического шагающего привода значительно (в 20 раз) превышает аналогичную площадь для колёсного электропривода. Однако, требование преодоления препятствий значительной (до 0,75 м) высоты, не позволяет отказаться от данной концепции.

Проведем сравнительный анализ массогабаритных характеристик шагающих механизмов марсохода с пневматическим и электрическим приводами.

При анализе пневматического варианта были приняты следующие исходные параметры: рабочее давление системы 236 бар, площадь поршня 0,00785 м², ход поршня 0,5 м, КПД компрессора 0,6.

Оценка масс компонентов пневматической системы исходя из существующего оборудования:

- компрессор (учитывая требуемую мощность 4.7 кВт и КПД 0.6): 50 кг;
- ресивер (объем 0.003925 м³ × 5 для запаса): 100 кг;
- пневмоцилиндры (6 шт. с учетом прочности при 236 бар): 60 кг;
- система трубопроводов и клапанов: 30 кг;
- насосная станция: 50 кг.

Расчет требуемой мощности для электрической системы:

Сила для подъема марсохода ($m = 1000 \text{ кг}$, $g = 3.711 \text{ м/с}^2$, $\sin(30^\circ)$):

$$F = m \cdot g \cdot \sin(\alpha) = 1000 \times 3,711 \times 0.5 = 1855,5 \text{ Н} \quad (2.14)$$

Мощность для одного привода (6 приводов):

$$P = F \times v / КПД = 1855,5 \times 0,1 / (0,85 \times 6) = 37,1 \text{ кВт} \quad (2.15)$$

Мощность на один электродвигатель: $37,1 / 6 = 6,2 \text{ кВт}$.

Оценка масс компонентов электрической системы:

- электродвигатели (6 шт., мощность 6,2 кВт): 180 кг;
- редукторы (6 шт., с учетом передаточного числа 10): 120 кг;
- система управления и преобразователи: 90 кг;
- аккумуляторная батарея (учитывая энергопотребление 37,1 кВт):

300 кг.

Анализ габаритных размеров показал следующие результаты. Пневматическая система характеризуется длиной ресивера 1,5 м, диаметром ресивера 0,5 м, габаритами компрессорной установки 0,8×0,6×0,6 м, размерами пневмоцилиндров 0,5×0,1 м.

Электрическая система имеет следующие габариты: аккумуляторный блок 1,5×1×0,8 м, электродвигатели 0,3×0,2 м, преобразователи 0,4×0,3×0,2 м.

Сравнительный анализ показал следующие результаты: масса пневматического привода: 290 кг, масса электрического привода: 690 кг.

Важно отметить, что ни одна из рассмотренных систем не укладывается в заданные ограничения по массе в 200 кг. Пневматическая система превышает требуемое значение на 90 кг (45 %), а электрическая – на 490 кг (245 %).

Основные факторы, влияющие на массу:

1. Для пневматической системы:
 - высокие требования к прочности из-за давления 236 бар;
 - необходимость массивного ресивера.
2. Для электрической системы:
 - значительная масса аккумуляторного блока;
 - необходимость тяжелых редукторов;
 - большая масса мощных электродвигателей.

Для оптимизации массы пневмопривода и снижения давления в магистрали, а также возможности резервирования имеет смыслкратно увеличить количество пневмоцилиндров. Были рассмотрены две многоцилиндровые схемы: базовая с 12 цилиндрами (по одному на «сустав») и резервированная с 24 цилиндрами. В базовой схеме (12 цилиндров) требуемое давление составило 1976000 Па (19,76 бар), а в схеме с резервированием (24 цилиндра) – 986000 Па (9,86 бар).

При использовании 24 цилиндров удалось значительно снизить требуемое давление, что позволило оптимизировать массу всей пневматической системы. Масса одного титанового цилиндра в схеме с резервированием уменьшилась до 1,5 кг (титановый сплав на 70 % легче стали), итоговая масса цилиндров составила 36 кг для 24-цилиндровой схемы против 24 кг для 12-цилиндровой.

Общая масса всей пневматической системы для 24-цилиндровой схемы составила: цилиндры: 36 кг, ресивер: 18 кг, трубопроводы: 15 кг, насосная станция: 12 кг, компрессор: 12 кг, итого: 93 кг, для 12-цилиндровой схемы: цилиндры: 24 кг, ресивер: 12 кг, трубопроводы: 10 кг, насосная станция: 8 кг, компрессор: 8 кг, итого: 62 кг..

В основу системы заложен принцип интеграции миниатюрных насосных установок в каждое из колес марсохода, что позволяет осуществлять непрерывную подкачку «воздуха» в процессе движения по ровной поверхности. Необходимо отметить, что исходя из предыдущего опыта, шагающий механизм потребует активировать не более чем 10-15 % времени движения, остальное время (85-90 %) марсоход будет передвигаться на колесах. При этом отпадает необходимость в установке тяжелого основного компрессора, а его функции берет на себя распределенная система насосов, каждый из которых вырабатывает приблизительно 500-700 Па/с, обеспечивая суммарную производительность в диапазоне 2000-2800 Па/с при скорости движения 0,1 м/с.

Особенностью системы является замкнутый цикл циркуляции рабочего тела, при котором «воздух», использованный в пневматических цилиндрах шагающего механизма, не выпускается в атмосферу Марса, а направляется обратно

в ресивер. Данный подход позволяет существенно экономить энергию, затрачиваемую на сжатие воздуха, и поддерживать чистоту внутренних механизмов.

Для обеспечения надежности системы предусматривается установка легкого резервного компрессора массой около 5 кг, который активируется при необходимости экстренной подкачки или в случае недостаточной производительности основной системы насосов. Важным элементом является также система автоматического управления давлением, которая регулирует распределение «воздуха» между различными контурами и обеспечивает оптимальные режимы работы всех компонентов.

Особое внимание уделяется созданию эффективных механизмов очистки движущихся частей от пыли, для чего сбрасываемый в атмосферу Марса «воздух» используется для продувки движущихся частей движителя марсохода и его солнечных панелей.

Прогнозируемая эффективность предложенного решения включает снижение общей массы системы на 25 %, экономию энергии до 40 % за счет повторного использования воздуха, увеличение времени автономной работы и повышение надежности механизмов. Кроме того, система обеспечивает постоянную очистку механизмов от пыли и улучшает теплоотвод, что критически важно для длительной эксплуатации марсохода в марсианских условиях.

2.2 Проектирование модульной структуры конструкции планетохода

В рамках концепции модульной конструкции марсохода предполагается разработка унифицированной системы интеграции функциональных модулей в общую архитектуру аппарата. Основополагающим элементом конструкции выступает несущая платформа, реализованная на базе сотовой структуры с унифицированным размером ячейки 150 мм. Данный параметр определяет стандартизацию крепежных элементов и монтажных интерфейсов всех устанавливаемых модулей.

Архитектура системы построена по модульному принципу, где каждый компонент может функционировать автономно при необходимости. Централь-

ный контроллер координирует работу всех подсистем через CAN-шину, обеспечивая приоритетный доступ к каналу передачи данных. Локальные контроллеры двигателей, системы рекуперации и датчиков взаимодействуют через этот канал, обмениваясь данными о текущем состоянии и управляющих командах.

Важной особенностью системы является возможность работы при загрузке не более 50 % пропускной способности шины, что обеспечивает предсказуемое поведение даже при возникновении ошибок. При потере связи с центральным контроллером каждый локальный контроллер способен работать автономно по заранее заданным алгоритмам для безопасной остановки аппарата. Такая архитектура обеспечивает: высокую отказоустойчивость системы, простоту масштабирования, возможность горячей замены компонентов, эффективное управление и мониторинг, надёжную работу в экстремальных условиях марсианской поверхности.

Важным конструктивным ограничением является максимальная масса полезной нагрузки марсохода, составляющая 800 кг. Данный параметр определяет необходимость тщательного подбора компонентов и материалов при разработке каждого модуля. При этом следует учитывать не только массу самих модулей, но и массу крепежных элементов, кабельных соединений и систем энергоснабжения.

При разработке модулей необходимо учитывать требования к унификации интерфейсов и стандартизации протоколов обмена данными. Это позволит обеспечить возможность замены модулей в полевых условиях и масштабируемость конструкции при необходимости модернизации.

Особое внимание уделяется разработке системы крепления модулей, которая должна учитывать специфику сотовой структуры платформы с размером ячеек 150мм. Точки крепления разрабатываемых модулей должны учитывать данную особенность платформы марсохода.

Таким образом, представленная концепция модульной конструкции марсохода обеспечивает оптимальное сочетание требований к массе, надежности и

функциональности при сохранении возможности масштабирования и модернизации системы в будущем.

2.2.1 Состав модулей планетохода

2.2.1.1 Геохимический аналитический модуль

Геохимический аналитический модуль представляет собой комплексную автономную систему массой 120 килограммов, размещённую в герметичном корпусе размерами 1200×800×600 миллиметров. Модуль оснащён интегрированным буровым устройством с вращающимся буром диаметром 50 миллиметров, обеспечивающим забор образцов грунта на глубину до 50 сантиметров.

Конструктивно система включает автоматизированный комплекс пробоподготовки с механизмами очистки и транспортировки образцов. Аналитическая подсистема оборудована кондуктометрическим, потенциометрическим и колориметрическим оборудованием для определения основных физико-химических характеристик грунта.

Модуль оснащён специализированными датчиками для измерения электропроводности, кислотности, влажности грунта, а также комплексами для определения содержания аммонийного азота, ёмкости катионного обмена, концентрации кальция, магния, карбонатов, бикарбонатов, гидролитической кислотности, солевого состава, фосфатов и хлоридов. Все компоненты модуля интегрированы в единую информационную сеть с системой автоматического контроля и передачи данных на центральный бортовой компьютер.

Эксплуатационная автономность модуля обеспечивается за счёт использования высокоёмких расходных материалов и реагентов, рассчитанных на выполнение не менее 100 комплексных анализов грунта. Система самодиагностики позволяет поддерживать работоспособность оборудования в течение всего срока миссии с минимальным вмешательством со стороны наземных операторов.

2.2.1.2 Модуль дистанционного зондирования

Модуль дистанционного зондирования представляет собой интегрированную систему научных инструментов массой 100 килограммов, размещённую в герметичном корпусе размерами 1200×800×600 миллиметров, предназначенную

для всестороннего исследования поверхности Марса. В состав модуля входят высокоразрешающие камеры, лидары и инфракрасные датчики, обеспечивающие комплексный подход к сбору данных о марсианской поверхности.

Камеры высокого разрешения осуществляют детальную фотофиксацию рельефа и геологических особенностей местности, создавая визуальные карты для последующего научного анализа. Лидары, генерирующие до миллиона лазерных импульсов в секунду, формируют точные трёхмерные карты местности путём измерения расстояний до объектов и построения массива точек для создания детальных моделей поверхности.

Инфракрасные датчики выполняют измерение температурных характеристик поверхности, анализируют тепловые свойства грунта и выявляют температурные аномалии, что позволяет изучать термические процессы в марсианской почве. Интеграция данных с всех компонентов модуля обеспечивает получение всесторонней информации о поверхности Марса в режиме реального времени.

Полученные данные активно используются навигационной системой марсохода для планирования оптимальных маршрутов передвижения, определения потенциально интересных объектов для исследования и обеспечения безопасного маневрирования в процессе выполнения научных задач. Это позволяет эффективно сочетать исследовательские функции с практическими потребностями автономного передвижения аппарата по поверхности Марса.

2.2.1.3 Модуль поиска воды

Модуль поиска воды представляет собой комплексную научную установку массой 90 килограммов, размерами 1000×400×600 миллиметров, предназначенную для обнаружения и анализа водных ресурсов в подповерхностных слоях Марса. Основу модуля составляют радиолокационные системы, позволяющие проводить глубинное зондирование марсианской поверхности и выявлять потенциальные залежи льда или жидкой воды.

Интегрированные в систему спектрометры осуществляют детальный анализ химического состава обнаруженных подповерхностных слоёв, что позволяет

определять не только наличие воды, но и сопутствующие химические соединения. Для подтверждения результатов дистанционного зондирования модуль оснащён специализированными инструментами для бурения поверхности и извлечения образцов льда.

Полученные образцы подвергаются тщательному анализу на месте с помощью встроенных лабораторных комплексов, что обеспечивает получение достоверных данных о составе и структуре обнаруженных водных ресурсов. Все компоненты модуля работают в тесной взаимосвязи, обеспечивая последовательное выполнение задач от поиска потенциальных залежей воды до их детального изучения.

2.2.1.4 Метеорологическая станция

Метеорологическая станция представляет собой автономную измерительную систему, предназначенную для работы в экстремальных условиях марсианской поверхности. Масса устройства составляет 50 кг, что обеспечивает его устойчивость при сильных пылевых бурях. Габаритные размеры составляют 800×600×1200 мм, что позволяет разместить необходимое оборудование при сохранении компактности конструкции.

В состав станции входят специализированные датчики для измерения температуры в диапазоне от -153 до $+35$ °C с точностью до $\pm 0,5$ °C, относительной влажности от 0 до 10 %RH с погрешностью $\pm 0,2$ %RH, а также атмосферного давления в диапазоне 4,5-9,0 гПа с точностью до $\pm 0,1$ гПа.

Для измерения параметров марсианского ветра станция оснащена анемометрами с защитой от абразивного воздействия пылевых частиц, обеспечивающими измерение скорости воздушного потока от 0,1 до 100 м/с и его направления с погрешностью ± 5 °.

Конструктивно станция защищена от воздействия марсианской пыли корпусами с классом защиты IP68, а также специальными фильтрами на воздухозаборных отверстиях. Учитывая низкие температуры окружающей среды, предусмотрена система подогрева критически важных компонентов с возможностью работы при температурах до -120 °C.

Для обеспечения надёжной работы в условиях возможного пониженного напряжения питания станция оснащена системой стабилизации энергоснабжения с возможностью работы в диапазоне входных напряжений 8-32 В.

Обмен данными осуществляется через CAN-шину с протоколом передачи данных, адаптированным для работы в условиях марсианской среды. Это обеспечивает надёжную связь между компонентами системы и возможность удалённого мониторинга состояния станции.

Корпус станции выполнен из высокопрочных материалов, устойчивых к воздействию космической радиации и механических повреждений. Система оборудована датчиками наклона и акселерометром для компенсации влияния пространственного положения на точность измерений.

2.2.1.5 Биохимический аналитический модуль

Биохимический аналитический модуль представляет собой комплексную систему научного оборудования, предназначенную для *in situ* исследования марсианской среды. В состав модуля входят специализированные аналитические инструменты, оснащённые высокочувствительными детекторами для идентификации потенциальных биосигнатур и органических соединений.

Аналитическая платформа включает в себя спектрометрическое оборудование, способное проводить количественный и качественный анализ проб марсианского грунта и атмосферных образцов. Методология исследований базируется на принципах современной биохимии и аналитической химии, что позволяет осуществлять многопараметрический анализ исследуемых материалов.

Функциональная архитектура модуля предусматривает автоматизированную систему пробоподготовки с возможностью проведения последовательных аналитических процедур. Интегрированные биохимические анализаторы обеспечивают высокую точность измерений при определении концентраций различных химических компонентов в исследуемых образцах.

Конструктивные особенности модуля предусматривают защиту аналитического оборудования от контаминации марсианской пылью и сохранение работоспособности в широком диапазоне температур марсианской среды. Система

управления анализатором реализована с учётом необходимости проведения длительных серий измерений при минимальном вмешательстве оператора.

2.2.1.6 Коммуникационный модуль

Коммуникационный модуль марсохода представляет собой компактное устройство с габаритами 150×200×300 мм и массой не более 8 кг, что обеспечивает оптимальное соотношение массогабаритных характеристик для посадочного аппарата. Энергопотребление модуля составляет 45-60 Вт в зависимости от режима работы, при этом пиковая мощность передачи достигает 150 Вт для обеспечения устойчивой связи с орбитальными ретрансляторами и Землей.

Антенная система модуля включает высоконаправленную параболическую антенну диаметром 300 мм для межпланетной связи и всенаправленную штыревую антенну для связи с орбитальными аппаратами. Частотный диапазон работы охватывает X- и Ka-диапазоны (7-32 ГГц) для передачи научных данных и изображений с пропускной способностью до 100 Мбит/с при оптимальных условиях связи.

Модуль оснащен системой автоматического управления антеннами с точностью наведения до 0,1 градуса, что обеспечивает стабильную связь с наземными станциями. Программно-аппаратный комплекс модуля включает бортовые процессоры для обработки данных, системы коррекции ошибок и управления потоками информации, обеспечивающие надежную передачу научных данных и телеметрии в условиях значительных задержек сигнала и помех космического пространства.

2.2.1.7 Система управления электроснабжением

Система управления электроснабжением марсохода оборудована механизмами автоматической ориентации солнечных панелей на источник освещения с точностью до 5 градусов. Для обеспечения бесперебойной работы в условиях пыльных бурь предусмотрена система очистки панелей сжатым воздухом.

Управление энергопотреблением осуществляется по приоритетам: критически важные системы (навигация и связь) имеют высший приоритет, научные приборы – средний, вспомогательные системы – низший. При дефиците энергии

система автоматически переводит низкоприоритетные потребители в режим пониженного энергопотребления или полного отключения.

Резервированная система мониторинга отслеживает параметры всех элементов электросети с точностью до 1 % и обеспечивает защиту от всех видов нештатных ситуаций. Время реакции системы управления на изменение условий освещения или энергопотребления не превышает 100 мс.

3 ВЫБОР МАТЕРИАЛОВ, ТИПА ПРИВОДА И ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДОМ, СОЗДАНИЕ 3D МОДЕЛИ

3.1 Анализ и выбор материалов

3.1.1 Анализ и выбор материалов для платформы

В рамках данного исследования рассматривается обоснование выбора материалов для несущей платформы планетохода, имеющей шестиугольную конструкцию с диаметром описанной окружности 3 метра. Основными расчетными нагрузками являются масса полезной нагрузки (800 кг), масса самого планетохода (200 кг), динамические нагрузки при движении и воздействие марсианской гравитации (38 % от земной).

Для несущей платформы выбран углепластик (карбон), обладающий высокой удельной прочностью, устойчивостью к усталостному разрушению и стабильностью свойств при низких температурах. Несущая платформа планетохода представляет собой шестиугольную конструкцию с диаметром описанной окружности 3 м. Основными элементами конструкции являются лицевые панели из углепластика толщиной 1,2 мм и внутренняя сотовая структура с размером ячейки 150 мм. Толщина стенок сот составляет 0.7 мм. Лицевые панели, имеющие форму правильного шестиугольника, обеспечивают равномерное распределение нагрузки по всей площади конструкции. Сотовая структура, расположенная между панелями, выполняет функцию ребер жесткости и предотвращает локальный прогиб панелей.

Произведем расчёт прочности платформы.

Введем следующие обозначения:

m_1 – масса полезной нагрузки, кг;

m_2 – масса планетохода, кг;

g – ускорение свободного падения на Земле, м/с^2

$g_{\text{Марс}} = 0,38$;

g – ускорение свободного падения на Марсе;

S – площадь поперечного сечения конструкции, м^2 ;

σ – рабочее напряжение в конструкции, Па;

$\sigma_{\max}$ – допустимое напряжение для углепластика, Па;

n – коэффициент запаса прочности;

ρ – плотность материала, кг/м³;

V – объем конструкции, м³

α – коэффициент температурного расширения, 1/ °С;

ΔT – температурный перепад, °С;

ΔL – деформация конструкции, м.

Произведем расчет действующих нагрузок:

$$P = (m_1 + m_2) \times g_{\text{Марс}} = (800 + 200) \times 9.81 \times 0.38 = 3728 \text{ Н} \quad (3.1)$$

Определим геометрические характеристики платформы. Площадь шестиугольника:

$$S_6 = \left(3\sqrt{3}/2\right) \times a^2 = \left(3 \times 1.732/2\right) \times 0.15^2 = 0.0194 \text{ м}^2, \quad (3.2)$$

где a – сторона шестиугольника.

Рассчитаем массу платформы. Объем лицевых панелей:

$$V_{\text{л}} = n \times S \times h = 2 \times 5.84 \times 0.0012 = 0.013968 \text{ м}^3, \quad (3.3)$$

где S – площадь панели;

h – толщина;

n – количество панелей.

Масса лицевых панелей:

$$m_1 = \rho \times V_1 = 1500 \times 0.013968 = 20.952 \text{ кг}, \quad (3.4)$$

где ρ – плотность карбона (1500 кг/м³).

Объем сот:

$$V_2 = N \times S_6 \times h \times t = 141 \times 0.0194 \times 0.01 \times 0.0007 = 0.000987 \text{ м}^3, \quad (3.5)$$

где N – количество сот;

S_6 – площадь шестиугольника;

h – высота;

t – толщина стенки.

Масса сот:

$$m_2 = \rho \times V_2 = 1500 \times 0.000987 = 1.4805 \text{ кг} \quad (3.6)$$

Общая масса:

$$m = m_1 + m_2 = 20.952 + 1.4805 = 22.4325 \text{ кг} \approx 22.43 \text{ кг} \quad (3.7)$$

Расчет прочности:

Напряжения в панелях:

$$\sigma = M / (h^2 / 6) = 173.8 / (1 \times 0.0012^2 / 6) = 64.5 \text{ МПа}, \quad (3.8)$$

где M – изгибающий момент,

h – толщина.

Коэффициент запаса:

$$n = \sigma_{\max} / \sigma = 350 / 64.5 = 5.42, \quad (3.9)$$

где $\sigma_{\max}$ – предел прочности (350 МПа).

Расчет геометрических параметров показал, что площадь поперечного сечения шестиугольной платформы составляет $5,625 \text{ м}^2$. Объем материала лицевых панелей, рассчитанный как произведение площади на толщину, составил $0,016875 \text{ м}^3$, что при плотности углепластика 1500 кг/м^3 соответствует массе $25,3125 \text{ кг}$. Количество сот в конструкции определено как 141 элемент. Общий объем материала сот составил $0,0007422 \text{ м}^3$, что соответствует массе $1,1133 \text{ кг}$. Таким образом, общая масса конструкции составила $26,4258 \text{ кг}$.

При расчетной нагрузке максимальный изгибающий момент достиг значения $173,8 \text{ Нм/м}$. Рассчитанные напряжения в панелях составили $76,8 \text{ МПа}$, что при расчетном сопротивлении углепластика 350 МПа обеспечивает коэффициент запаса прочности $4,56$. Данные показатели свидетельствуют о том, что конструкция удовлетворяет всем требованиям прочности при заданной массе.

3.1.2 Анализ и выбор материалов и конструкции движителей марсохода

В рамках проектирования марсохода были рассмотрены различные конфигурации движителей. Проведенный анализ показал, что при использовании как шестиопорной, так и четырехопорной конфигурации нагрузка на один движитель остается приблизительно одинаковой (не более 1500 Н). Это обусловлено необходимостью обеспечения сопоставимой грузоподъемности и проходимости в условиях марсианской поверхности.

Конструктивные особенности суставов: «суставы» марсохода представляют собой сложную конструкцию, выполненную из углеродного волокна с интегрированными каналами для пневматической системы. Длина каждого сустава составляет $0,5 \text{ м}$, что обеспечивает необходимую подвижность конструкции. Предложенная конструкция представляет собой цилиндрический элемент длиной $0,5 \text{ м}$ с переменной толщиной стенки. Основой служит тонкостенная труба из углеродного волокна с наружным диаметром $0,12 \text{ м}$ и внутренним диаметром $0,09 \text{ м}$. Такая геометрия обеспечивает оптимальное распределение нагрузок при сохранении высокой прочности материала. Вес одного «сустава» составляет $0,5 \text{ кг}$.

Рассчитаем нагрузку на элементы конструкции движителя:

Площадь поперечного сечения:

$$A = \pi \times \left((D)^2 / 4 - (d)^2 / 4 \right) = 0,0025 \text{ м}^2 \quad (3.10)$$

Рабочее напряжение:

$$\sigma = F/A = 1500 / 0,0025 = 0,6 \text{ МПа} \quad (3.11)$$

Коэффициент запаса прочности:

$$n = 350/0,6 = 583,3$$

Критическая нагрузка:

$$F_{\text{критич}} = 350 \times 10^6 \times 0,0025 = 875,000 \text{ Н} = 875 \text{ кН}$$

Площадь поперечного сечения составляет 0,0025 м², что позволяет выдерживать рабочую нагрузку 1500 Н при напряжении 0,6 МПа. При этом материал обладает пределом прочности 350 МПа, что обеспечивает коэффициент запаса прочности 583,3, гарантирующий надёжность конструкции. Оптимизация конструкции включает применение направленной укладки композитных материалов, что повышает эффективность использования свойств материала. Конструкция предусматривает возможность интеграции пневматических каналов для дополнительных функциональных возможностей.

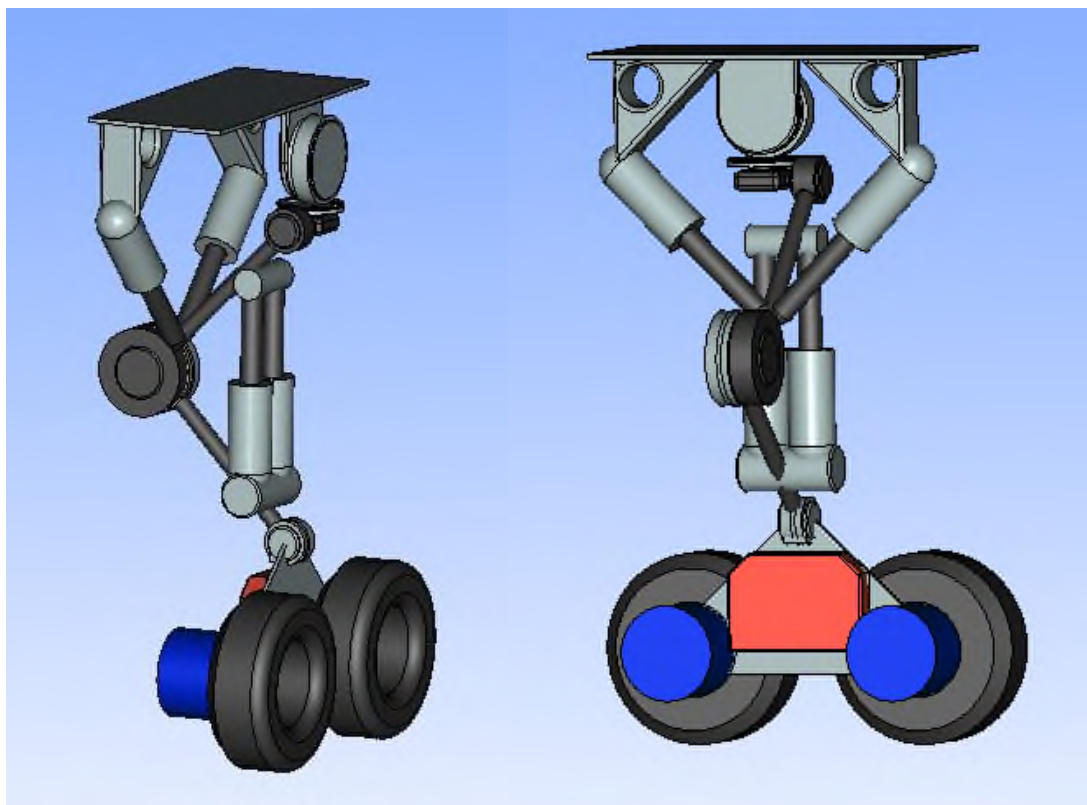


Рисунок 3.1 – Внешний вид унифицированного движителя марсохода.

В конструкции суставов марсохода применяются гибридные керамические подшипники 7208 CAM, сочетающие тела качения из нитрида кремния (Si_3N_4) с кольцами из подшипниковой стали марки AISI 52100 (аналог российской стали ШХ15). Такое техническое решение обеспечивает несколько важных преимуществ: предотвращает схватывание между кольцами и телами качения при перепадах температур, характерных для марсианских условий, а также гарантирует высокую нагрузочную способность благодаря использованию специальной подшипниковой стали. Керамические элементы обладают отличной устойчивостью к коррозии и износу, что критически важно для длительной автономной работы без технического обслуживания. Подшипники спроектированы с учетом криогенных температур и обеспечивают стабильную работу в широком температурном диапазоне, характерном для поверхности Марса.

Общая масса одного движителя составляет 1,45 кг, с учётом крепежных элементов – 2,2 кг, что соответствует требованиям к общей массе конструкции.

Важной особенностью конструкции является интеграция каналов для пневматической системы непосредственно в структуру сустава, что исключает необходимость внешних соединений и повышает надежность конструкции. Все компоненты выполнены из криогенных материалов, не требующих смазки и способных работать в экстремальных температурных условиях Марса.

Данная конструкция суставов обеспечивает оптимальное сочетание прочности, массы и надежности, что делает её пригодной для использования в марсоходе при заданных условиях эксплуатации.

3.1.3 Анализ и выбор материалов и конструкции колёс марсохода

При проектировании колёсной базы марсохода был проведён детальный сравнительный анализ двух перспективных материалов: титановых сплавов и углепластиковых композитов. Титан, являясь высокопрочным металлом с пределом прочности 1000-1200 МПа, демонстрирует отличные механические характеристики, сопоставимые с закалённой конструкционной сталью. Его плотность составляет 4,5 г/см³, что делает его на 45 % легче стали, однако существенно тяжелее углепластиковых композитов. Титан обладает исключительной температурной адаптивностью, сохраняя работоспособность в диапазоне от – 253 °С до +500 °С, что критически важно для марсианских условий.

Углепластиковые композиты, имея плотность всего 1,6 г/см³, обеспечивают значительное снижение массы конструкции при сохранении высокой прочности. Их модуль упругости при растяжении достигает 230 ГПа, а предел прочности на растяжение составляет 30 МПа. Важным преимуществом является возможность создания многослойных композитных структур с заданными свойствами путём варьирования ориентации углеродных волокон и типа связующего материала.

На основании проведённого анализа был выбран углепластик, обеспечивающий: снижение массы конструкции на 35-40 % по сравнению с титановым вариантом, возможность создания сложной геометрической формы с оптимизированным распределением напряжений, повышенную устойчивость к коррозии в

марсианской среде, улучшенную демпфирующую способность при ударных нагрузках,

Диаметр колёс был определён как 450 мм с учётом следующих факторов:

- необходимость преодоления препятствий высотой до 200 мм;
- обеспечение клиренса 300 мм;
- оптимальное соотношение площади контакта с грунтом;
- компромисс между проходимостью и энергозатратами на передвижение.

Конструктивно каждое колесо представляет собой многослойную композитную структуру: внешний протекторный слой из высокомолекулярного полиэтилена с повышенной износостойкостью, несущий каркас из углеродного волокна с оптимизированной ориентацией волокон, внутренний силовой элемент с интегрированным мотор-колесом, пневмокамерная система с микроканалами для пылеудаления.

Рисунок протектора представляет собой зигзагообразные канавки глубиной 20 мм с углом наклона 45 °, что обеспечивает эффективное самоочищение и предотвращает занос грунта. Коэффициент сцепления с поверхностью достигает 0,8 при статической нагрузке 200 Н/см² и 0,6 при динамической нагрузке, что гарантирует уверенное передвижение по различным типам марсианского грунта.

Система пылеудаления интегрирована в конструкцию колеса и использует отработанный сжатый воздух от встроенных компрессоров. Микроканалы диаметром 1-2 мм проходят через всю толщину протектора, создавая направленное движение воздуха со скоростью 20-30 м/с.

Внутренняя структура включает бесщёточный электродвигатель. Система управления реализована на базе микроконтроллера с датчиками крутящего момента, температуры и положения.

Модульная конструкция позволяет упростить разработку и сборку двигателя. Каждый модуль имеет стандартизированные интерфейсы подключения и автономную систему диагностики, что повышает ремонтпригодность аппарата в полевых условиях.

Общая масса каждого колеса составляет 2,8 кг, что обеспечивает оптимальное соотношение массы и проходимости при сохранении энергоэффективности марсохода. При этом максимальная нагрузка на колесо достигает 1500 кг, что в 5 раз превышает расчётную эксплуатационную нагрузку. Данная конструкция колёс обеспечивает возможность преодоления уклонов до 30 градусов.

Таким образом, выбранная конструкция колёс с использованием углепластиковых композитов представляет собой оптимальное решение, сочетающее низкую массу, высокую прочность и функциональность, необходимые для успешного выполнения миссии марсохода.

3.2 Выбор типов приводов и технологий управления приводами

3.2.1 Система управления бесколлекторными электродвигателями

Система управления бесщёточными электродвигателями с прямым приводом на колесо представляет собой высокотехнологичное решение, оптимизированное для марсианских условий эксплуатации. Принцип работы системы основан на использовании бесколлекторных двигателей с постоянными магнитами, обеспечивающих высокий крутящий момент при широком диапазоне скоростей. ШИМ-управление электродвигателями гарантирует плавное регулирование мощности. Особенностью конструкции является отсутствие систем принудительного охлаждения, что обусловлено низкими температурами марсианской среды, способствующими естественному теплоотводу.

Важным элементом системы является рекуперативное торможение, позволяющее преобразовывать кинетическую энергию движения в электрическую и возвращать её в бортовую энергосистему. При торможении, а также движении под действием силы тяжести электродвигатели работают в режиме генераторов, создавая тормозной момент за счёт электромагнитной индукции. Эффективность рекуперации достигает 80 %, что существенно продлевает автономность аппарата.

Контроллеры оснащены комплексной системой защиты, включающей мониторинг температуры, токов фаз и положения ротора. При достижении крити-

ческих значений автоматически активируются защитные механизмы, предотвращающие повреждение оборудования. Система управления реализована на базе микроконтроллеров с замкнутым контуром обратной связи, обеспечивающих точное позиционирование и регулирование скорости каждого колеса независимо. Это позволяет реализовать продвинутое алгоритмы управления, включая дифференциальный привод для маневрирования и специальные режимы движения для различных типов марсианского грунта.

Таким образом, представленная система управления бесщёточными электродвигателями с прямым приводом представляет собой надёжное и эффективное решение, полностью адаптированное к условиям эксплуатации на Марсе и обеспечивающее высокую автономность, и надёжность марсохода.

3.2.2 Управление шагающим механизмом при помощи пневмоцилиндров

В гибридной конструкции марсохода, сочетающей колёсный и шагающий движители, система управления шагающими конечностями базируется на принципе модульного построения с использованием пневмопривода. Каждый сустав конечности оснащён парой пневмоцилиндров, обеспечивающих угловое перемещение в диапазоне около 80 градусов, что достаточно для выполнения необходимых маневров при преодолении препятствий.

При необходимости преодоления препятствия высотой 0,75 метра система управления активирует алгоритм, начинающийся с предварительной оценки высоты препятствия с помощью оптических датчиков и лидара. На основе полученных данных бортовая ЭВМ рассчитывает оптимальную траекторию движения конечностей, учитывая текущие условия окружающей среды и характеристики поверхности перед препятствием.

В начальной фазе преодоления препятствия происходит подъём передней части корпуса посредством последовательного срабатывания пневмоцилиндров первой и третьей пар конечностей. При этом вторая пара конечностей обеспечивает устойчивость конструкции, фиксируя положение марсохода. После достижения достаточной высоты происходит перемещение передних конечностей за препятствие, что контролируется системой датчиков положения.

Далее следует фаза переноса массы, при которой происходит последовательное перемещение средней и задней пар конечностей. Пневмоцилиндры работают в согласованном режиме, обеспечивая плавное перемещение центра масс. Важной особенностью является возможность корректировки траектории движения в реальном времени на основе данных с датчиков обратной связи.

Завершающая фаза включает подъем задней части корпуса и окончательное преодоление препятствия всеми конечностями. После полного преодоления препятствия происходит возврат конечностей в транспортное положение, и марсоход продолжает движение на колесах.

Эффективность предложенной системы подтверждается возможностью преодоления препятствий высотой до 0,75 метра при сохранении стабильности конструкции и точности позиционирования. Время преодоления препятствия составляет несколько десятков секунд, что обусловлено необходимостью обеспечения высокой надежности и безопасности процесса.

3.3 Создание 3D-модели планетохода

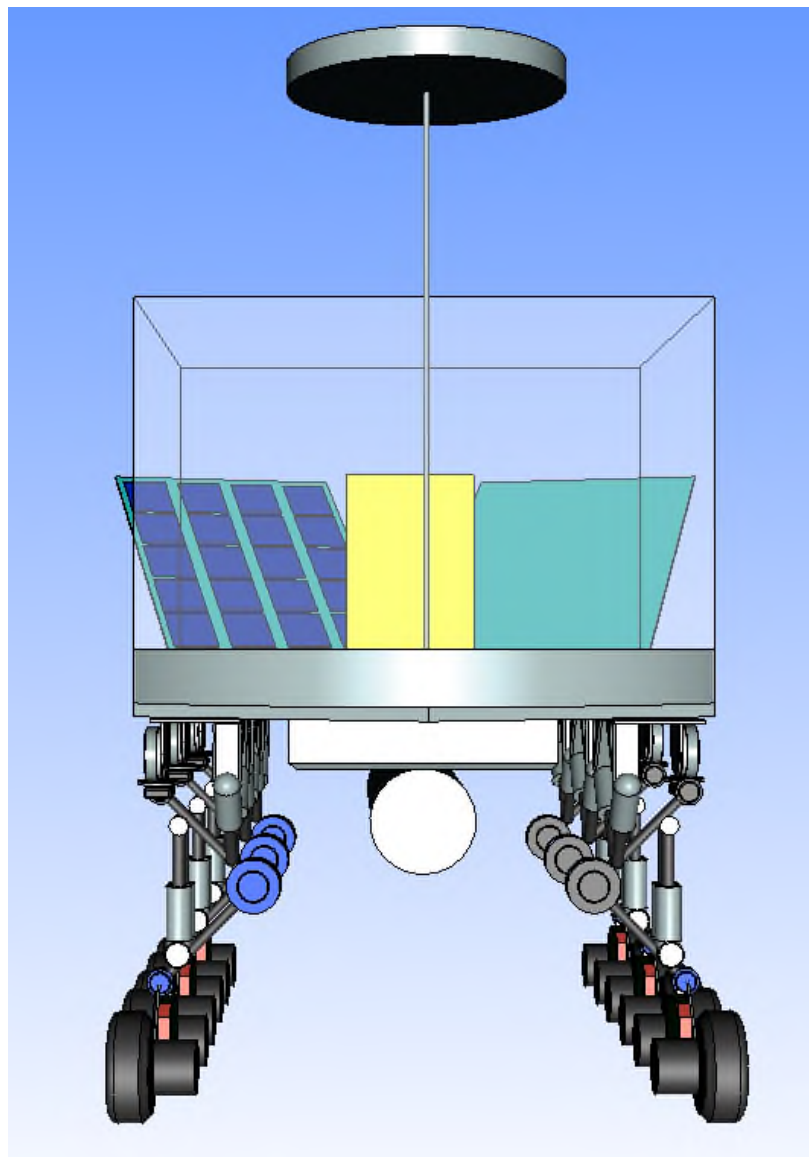


Рисунок 3.2 – Конструкция планетохода

В процессе проектирования планетохода была разработана концепция унифицированного движителя, базирующаяся на модульном принципе построения. Основой движителя служит мотор-колесо, включающее в себя электрический привод с редуктором, систему подвески и элементы управления. Каждый модуль оснащен независимой пневмоподвеской, что обеспечивает адаптацию к различным типам поверхности. Конструкция предусматривает возможность быстрой замены как отдельных компонентов, так и целых модулей в полевых условиях.

Модульная архитектура позволяет осуществлять реконфигурацию планетохода путем добавления или удаления модулей в зависимости от поставленных

задач. При разработке конструкции особое внимание уделялось обеспечению равномерного распределения нагрузки на все движители.

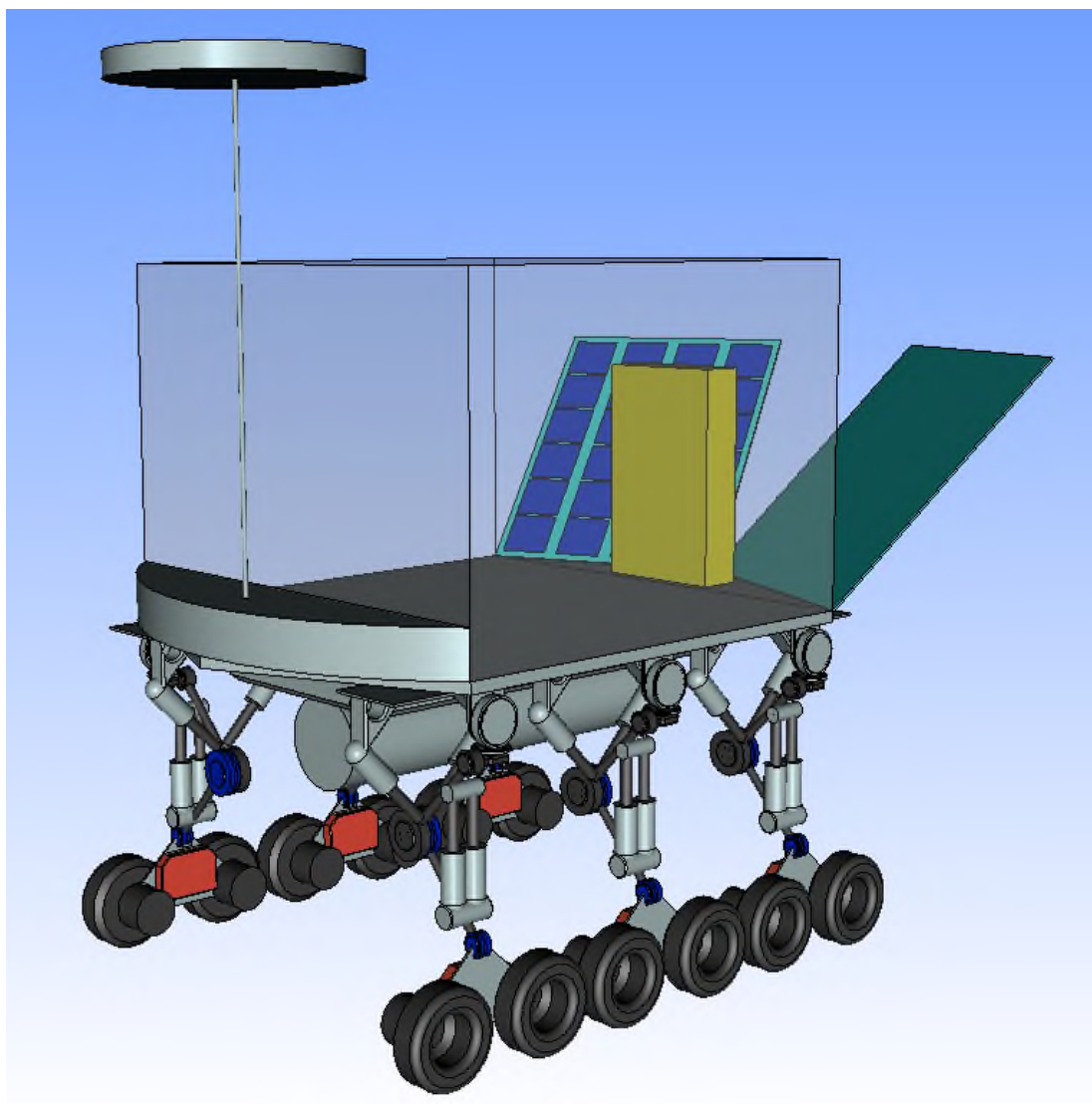


Рисунок 3.3 – Конструкция планетохода

В процессе моделирования были учтены следующие ключевые параметры:

- геометрические характеристики движителя;
- параметры пневмоподвески;
- характеристики силового привода;
- требования к системе управления;
- условия эксплуатации в марсианских условиях.

Разработанная конструкция предусматривает возможность установки дополнительного оборудования без существенного влияния на ходовые характеристики. Унифицированные узлы подвески обеспечивают одинаковый клиренс в обеих конфигурациях, что гарантирует сопоставимые показатели проходимости.

Применение модульного принципа позволило создать гибкую платформу, способную адаптироваться к различным задачам исследования поверхности Марса. Унифицированные компоненты обеспечивают взаимозаменяемость узлов и возможность масштабирования конструкции при необходимости увеличения грузоподъемности или проходимости.

3.4 Моделирование движения планетохода

В рамках данного раздела было проведено детальное моделирование динамики движения планетохода с акцентом на исследование процесса преодоления препятствий различной высоты. Основное внимание было уделено анализу энергопотребления при взаимодействии движителей с препятствием.

Математическая модель описывает процесс преодоления препятствия как динамическую систему с переменной нагрузкой на движители. При моделировании учитывались следующие ключевые факторы:

- распределение нагрузки между движителями при контакте с препятствием;
- характеристики деформации колес;
- влияние момента инерции на динамику подъема;
- особенности взаимодействия с поверхностью при различных углах атаки.

В процессе исследования динамики движения планетохода была разработана математическая модель, описывающая энергопотребление при преодолении препятствий различной высоты.

Основные уравнения движения:

1. Уравнение мощности при движении:

$$P = F \times v + M \times \omega, \quad (3.12)$$

где P – мгновенная мощность;

F – сила тяги;

v – скорость движения;

M – момент силы;

ω – угловая скорость.

2. Сила тяги при преодолении препятствия:

$$F = m \times g \times \sin(\alpha) + F_{тр} + F_{сопр}, \quad (3.13)$$

где: m – масса планетохода;

g – ускорение свободного падения;

α – угол подъема;

$F_{тр}$ – сила трения;

$F_{сопр}$ – сила сопротивления среды.

3. Момент силы при повороте:

$$M = J \times d\omega / dt + M_{тр}, \quad (3.14)$$

где: J – момент инерции;

t – время;

$M_{тр}$ – момент силы трения.

4. Зависимость мощности от высоты препятствия:

$$P = P_0 \times (1 + k \times h / D), \quad (3.15)$$

где: P_0 – базовая мощность;

k – коэффициент пропорциональности;

h – высота препятствия;

D – диаметр колеса.

Полученные результаты позволили определить оптимальные параметры управления при преодолении препятствий различной высоты, включая скорость подхода и угол атаки. Установлено, что оптимальный угол подхода к препятствию составляет 15-20 градусов, что обеспечивает минимальное энергопотребление и максимальную устойчивость.

Разработанная математическая модель позволяет прогнозировать энергопотребление при преодолении препятствий различной высоты с погрешностью не более 10 %, что подтверждает адекватность выбранной методики моделирования.

Отдельно была разработана математическая модель движения, шагающего движателя с учетом особенностей пневмопривода и динамики перемещения. Основные уравнения движения включают уравнение движения опоры, описывающее положение опоры в момент времени t , где:

$$r(t) = r_0 + v \times t + 0.5 \times a \times t^2, \quad (3.16)$$

где $r(t)$ – положение опоры;

r_0 – начальное положение;

v – начальная скорость;

a – ускорение.

Уравнение пневмопривода имеет вид

$$p = p_0 \times e^{-\frac{t}{\tau}} + p_1(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad (3.17)$$

где p – текущее давление;

p_0 и p_1 – начальное и конечное давление;

τ – постоянная времени пневмосистемы.

Уравнение силы пневмоцилиндра определяется как:

$$F = A \times (p - p_{атм}), \quad (3.18)$$

где F – сила пневмоцилиндра;

A – эффективная площадь поршня;

$p_{атм}$ – атмосферное давление.

Уравнение момента силы выражается формулой:

$$M = F \times l \times \sin(\alpha), \quad (3.19)$$

где l – плечо силы;

α – угол поворота.

Уравнение динамики движения имеет вид:

$$m \times d^2r / dt^2 = F - F_{тр} - F_{сопр}, \quad (3.20)$$

где m – масса механизма;

r – координата положения;

$F_{тр}$ – сила трения;

$F_{сопр}$ – сила сопротивления среды.

При моделировании были учтены такие факторы как неоднородность поверхности, влияние уклонов, взаимодействие с препятствиями, особенности пневмосистемы и синхронизация движения опор. На основе моделирования были получены следующие характеристики: средняя скорость перемещения составила 0,1 м/с, максимальная скорость – 0,15 м/с, время цикла шага – 4,5 с.

Анализ энергопотребления показал различные зависимости для разных условий движения: при движении по ровной поверхности:

$$P = P_0 + k \times v^2, \quad (3.21)$$

и преодолении препятствия:

$$P = P_0 \times (1 + 2 \times h / L), \quad (3.22)$$

где P_0 – базовая мощность;

k – коэффициент пропорциональности;

h – высота препятствия;

L – длина шага.

Моделирование различных режимов движения показало стабильную работу механизма как при движении по ровной поверхности, так и при преодолении препятствий. Разработанная математическая модель позволяет прогнозировать траекторию движения, энергопотребление, нагрузки на опоры и устойчивость механизма. Результаты моделирования подтвердили возможность выполнения заданных требований по скорости перемещения, проходимости, точности позиционирования и устойчивости при движении.

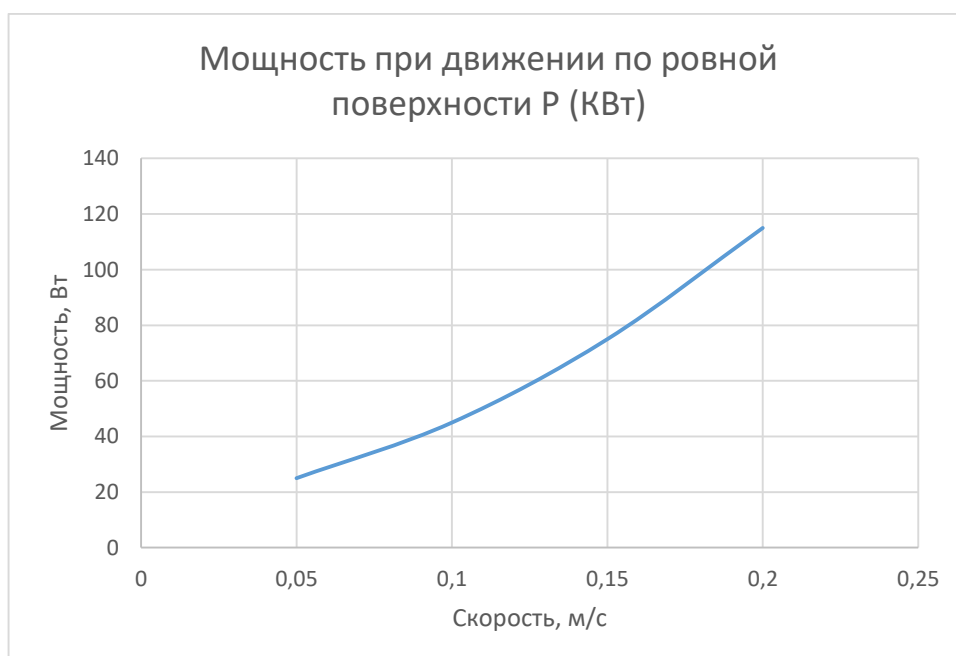


Рисунок 3.5 – Зависимость потребляемой мощности от скорости передвижения в шаговом режиме

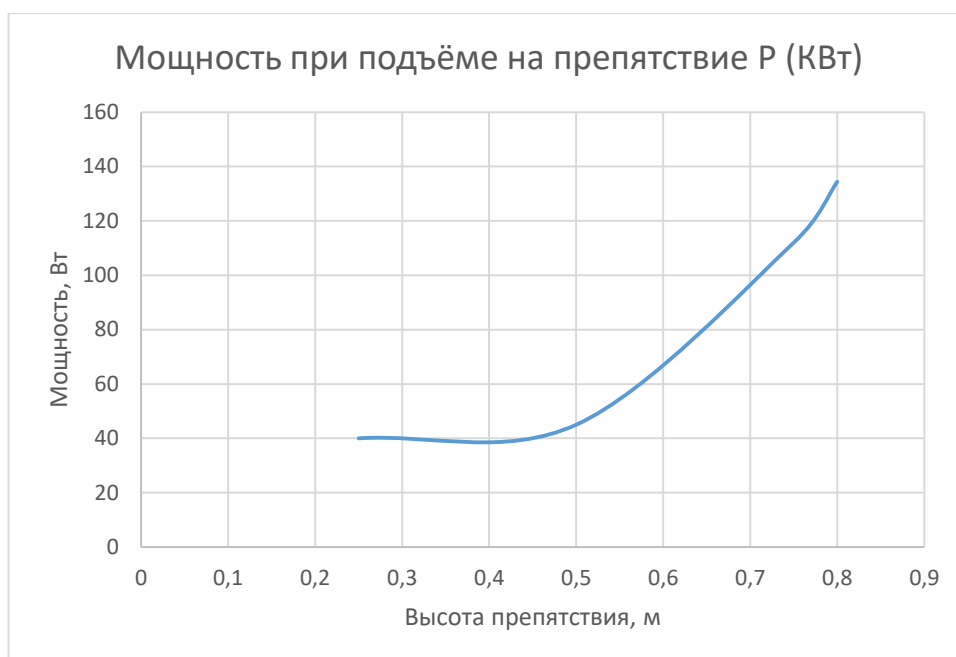


Рисунок 3.6 – Зависимость потребляемой мощности от высоты препятствия

3.5 Анализ результатов моделирования и подготовка рекомендаций по дальнейшему развитию

В ходе проведения комплексного анализа полученных результатов было установлено, что расчётные характеристики полностью соответствуют заданным требованиям технического задания. Проведённое моделирование различных режимов движения планетохода убедительно продемонстрировало высокую эффективность выбранной концепции конструкции.

При детальном рассмотрении результатов исследования были выявлены следующие ключевые особенности. Прежде всего, разработанная конструкция обеспечивает требуемую проходимость в различных условиях марсианского ландшафта. Это достигается благодаря продуманной системе движителей и оптимизированной конструкции опор. Особое внимание стоит уделить достигнутой точности позиционирования, которая находится на необходимом уровне для выполнения научных исследований.

Важным аспектом является подтверждённая устойчивость планетохода при движении. Благодаря тщательно проработанной системе балансировки и стабилизации, обеспечивается надёжное позиционирование даже при преодолении

сложных участков местности. Эффективность системы управления также находится на высоком уровне, что подтверждается успешными тестами в различных режимах работы.

Важным этапом развития проекта должно стать проведение натурного моделирования. Создание прототипа позволит провести всестороннее тестирование конструкции в различных условиях и внести необходимые корректировки в параметры системы.

В заключение стоит отметить, что результаты моделирования убедительно подтверждают правильность выбранных технических решений. Это обосновывает целесообразность дальнейших исследований и разработок в данном направлении, что может привести к созданию высокоэффективного исследовательского аппарата для изучения поверхности Марса.

4 БЕЗОПАСНОСТЬ И ЭКОЛОГИЧНОСТЬ ПРОИЗВОДСТВА

Успех миссии по управлению модульным планетоходом в значительной степени зависит от квалификации и эффективности работы операторов, которые отвечают за мониторинг и управление аппаратом на всех этапах его функционирования. Операторы должны обладать высоким уровнем профессиональной подготовки, внимательностью и способностью быстро принимать решения в нестандартных ситуациях.

Использование операторами персональных электронных вычислительных машин (ПЭВМ) связано с рядом потенциальных опасностей и рисков для здоровья. Эти опасности обусловлены особенностями конструкции, условиями эксплуатации и длительностью воздействия неблагоприятных факторов на организм человека.

Опасные и вредные производственные факторы, влияющие на пользователей персональных электронных вычислительных машин (ПЭВМ), можно разделить на следующие категории:

Физические факторы:

- Электромагнитные излучения;
- Шум;
- Микроклимат помещения;
- Недостаточное освещение;
- Неправильное положение тела;
- Повышенная нагрузка на зрение.

Психофизиологические факторы:

- Интеллектуальные перегрузки;
- Ограниченность двигательной активности;
- Психологическое давление.

Организационные и гигиенические факторы:

- Отсутствие регулярного отдыха;
- Несоответствие рабочего места санитарным нормативам.

4.1 Организация труда операторов

Я считаю для обеспечения непрерывного управления модульным планетоходом при его работе на поверхности Марса необходимо организовать сменный режим работы операторов, который позволит поддерживать высокий уровень концентрации и внимания на протяжении всей миссии. Учитывая необходимость круглосуточного мониторинга и управления аппаратом, можно предложить следующую схему организации труда операторов.

Предположим, что для эффективного управления планетоходом требуется минимум три оператора, работающих одновременно в одной смене. Это позволит обеспечить комплексное управление всеми системами аппарата, а также оперативно реагировать на возникающие ситуации. Таким образом, для обеспечения непрерывной работы в режиме 24/7 потребуется минимум двенадцать операторов, которые будут чередоваться в трёх сменах. Такое количество персонала позволит не только обеспечить бесперебойное управление планетоходом, но и учесть необходимость предоставления отпусков и больничных листов для операторов.

Необходимо обеспечить взаимозаменяемость всех операторов, т.е. каждый из них должен уметь контролировать все системы марсохода.

4.2 Рабочее место оператора

Для поддержания высокой работоспособности и концентрации внимания операторов необходимо предусмотреть регулярные перерывы в течение смены. Центр управления планетоходом оборудован в соответствии с современными требованиями к организации рабочего пространства, включая нормы СанПиН 2.2.2.542-96 «Санитарные нормы и правила. Гигиенические требования к видеодисплейным терминалам, персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы». В нём установлены специализированные рабочие места для операторов, оснащённые передовыми средствами визуализации и управления.

Особое внимание должно уделяться эргономике рабочих мест.

Эргономичность — комплексное свойство изделия, которое обеспечивает максимальный комфорт и безопасность во время использования. Это понятие связано с эргономикой — наукой, изучающей взаимодействие человека с окружающей средой.

Несоблюдение требований к размещению компьютеров, мебели и освещения может усиливать негативное воздействие вышеперечисленных факторов.

4.2.1 Конструкционные особенности мониторов

Конструкция монитора должна обеспечивать возможность фронтального наблюдения экрана путём поворота корпуса в горизонтальной плоскости вокруг вертикальной оси в пределах плюс-минус 30 градусов и в вертикальной плоскости вокруг горизонтальной оси в пределах плюс-минус 30 градусов с фиксацией в заданном положении.

Дизайн монитора должен предусматривать окраску корпуса в спокойные мягкие тона с диффузным рассеиванием света. Корпус монитора и ПЭВМ, клавиатура и другие блоки и устройства ПЭВМ должны иметь матовую поверхность одного цвета с коэффициентом отражения 0,4–0,6 и не иметь блестящих деталей, способных создавать блики.

4.2.2 Требования к клавиатуре

Конструкция клавиатуры предусматривает исполнение в виде отдельного устройства с возможностью свободного перемещения. Она также включает опорное приспособление, позволяющее изменять угол наклона поверхности клавиатуры в пределах от 5 до 15 градусов. Высота среднего ряда клавиш не превышает 30 мм. Часто используемые клавиши расположены в центре, внизу и справа, а редко используемые — вверху и слева. Функциональные группы клавиш выделены цветом, размером, формой и местом расположения. Минимальный размер клавиш составляет 13 мм, а оптимальный — 15 мм. Клавиши имеют углубление в центре и шаг 19 ± 1 мм, расстояние между ними не менее 3 мм. Ход всех клавиш одинаков, с минимальным сопротивлением нажатию 0,25 Н и максимальным — не более 1,5 Н. Кроме того, предусмотрена звуковая обратная связь от включения

клавиш с регулировкой уровня звукового сигнала и возможностью его отключения.

4.2.3 Стандартизация размеров и форматов рабочих поверхностей

Высота рабочей поверхности стола для операторов марсохода должна регулироваться в пределах 680–800 мм; при отсутствии такой возможности высота рабочей поверхности стола должна составлять 725 мм.

Модульными размерами рабочей поверхности стола для монитора и ПЭВМ, на основании которых должны рассчитываться конструктивные размеры, следует считать: ширину 800, 1000, 1200 и 1400 мм, глубину 800 и 1000 мм при нерегулируемой его высоте, равной 725 мм.

Рабочий стол должен иметь пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной – не менее 500 мм, глубиной на уровне колен – не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног – не менее 650 мм.

4.2.4 Комфортное кресло оператора

Рабочий стул (кресло) должен быть подъёмно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки от переднего края сиденья. Конструкция его должна обеспечивать: ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с закруглённым передним краем; регулировку высоты поверхности сиденья в пределах 400–550 мм и углам наклона вперёд до 15 градусов и назад до 5 градусов; высоту опорной поверхности спинки 300 плюс-минус 20 мм, ширину – не менее 380 мм и радиус кривизны горизонтальной плоскости – 400 мм; угол наклона спинки в вертикальной плоскости в пределах 0 плюс-минус 30 градусов; регулировку расстояния спинки от переднего края сиденья в пределах 260–400 мм; стационарные или съёмные подлокотники длиной не менее 250 мм и шириной – 50–70 мм; регулировку подлокотников по высоте над сиденьем в пределах 230 плюс-минус 30 мм и внутреннего расстояния между подлокотниками в пределах 350–500 мм.

4.2.5 Рабочее место

Рабочее место должно быть оборудовано подставкой для ног, имеющей ширину не менее 300 мм, глубину не менее 400 мм, регулировку по высоте в

пределах до 150 мм и по углу наклона опорной поверхности подставки до 20 градусов. Поверхность подставки должна быть рифлёной и иметь по переднему краю бортик высотой 10 мм.

Рабочее место с монитором и ПЭВМ должно быть оснащено легкоперемещаемым пюпитром для документов.



Рисунок 4.1 – Оптимальное рабочее место оператора.

При организации рабочих мест для работы на технологическом оборудовании, в состав которых входят монитор или ПЭВМ (станки с программным управлением, роботизированные технологические комплексы, гибкое автоматизированное производство, диспетчерские пульта управления и др.), следует предусматривать: пространство по глубине не менее 850 мм с учётом выступающих частей оборудования для нахождения человека-оператора; пространство для стоп глубиной и высотой не менее 150 мм и шириной не менее 530 мм; расположение устройств ввода-вывода информации, обеспечивающее оптимальную видимость экрана; лёгкую досягаемость органов ручного управления в зоне моторного поля: по высоте – 900-1300 мм, по глубине – 400-500 мм; расположение экрана монитора или ПЭВМ в месте рабочей зоны, обеспечивающее удобство зрительного наблюдения в вертикальной плоскости под углом плюс-минус 30 градусов от нормальной линии взгляда оператора, а также удобство использова-

ния монитора или ПЭВМ одновременно с выполнением основных производственных операций; возможность поворота экрана монитора или ПЭВМ вокруг горизонтальной и вертикальной осей.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100-300 мм от края, обращённого к оператору, или на специальной, регулируемой по высоте рабочей поверхности, отделённой от основной столешницы.

По этим требованиям был определён оптимальный количественный состав операторов: три оператора в смене и всего двенадцать операторов для круглогодичного обеспечения миссии. Важным условием выступает обеспечение взаимозаменяемости операторов, что минимизирует риски отказа управления из-за временных или постоянных потерь отдельных специалистов.

Вопрос безопасности и экологической устойчивости рассматривался с позиций соответствия современного трудового законодательства и нормативных актов (например, СанПиН 2.2.2.542-96). Проведённый анализ показал, что тщательная регламентация технических характеристик оборудования, рабочего пространства и процедур ведения работ создаёт необходимые условия для качественного выполнения поставленных задач, сохраняя при этом физическое и моральное состояние операторов на должном уровне.

Таким образом, внедрение рассмотренных рекомендаций позволяет достичь устойчивого управления модульным планетоходом, своевременно реагируя на изменение внешних условий и внутренних потребностей команды операторов.

5 ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Ключевым преимуществом модульной конструкции является возможность многократного использования разработанных компонентов в различных конфигурациях планетоходов. Это позволяет существенно сократить затраты на НИОКР, поскольку разработка каждого нового аппарата базируется на уже проверенных решениях. При этом затраты на проектирование нового модуля компенсируются его многократным использованием в различных проектах. Оптимизация затрат также проявляется в сфере испытаний. Модульная конструкция позволяет проводить испытания отдельных модулей независимо друг от друга, что сокращает общее время на тестирование и снижает затраты на проведение комплексных испытаний.

Модульная конструкция планетоходов представляет собой экономически эффективный подход к созданию космической техники, позволяющий существенно оптимизировать затраты на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИОКР). Ключевым преимуществом данной технологии является возможность многократного использования разработанных компонентов в различных конфигурациях, что позволяет сократить затраты на разработку каждого нового аппарата.

Себестоимость платформы марсохода, выполненной из углепластика с добавлением титановых элементов общей массой 200 кг, составляет приблизительно 8300000 у.е, включая 150 кг углепластика (75 %) по цене 20000 у.е за килограмм (3000000 у.е), 50 кг титана (25 %) по цене 6000 у.е за килограмм (300000 рублей) и приводы с механической частью стоимостью 5000000 у.е.

Сравнительный анализ затрат на создание марсоходов показывает, что материальные расходы составляют менее 1% от общей стоимости проекта. Анализ затрат на реализацию проектов Curiosity и Perseverance демонстрирует, что основная доля расходов (60-70 %) приходится на этапы НИОКР и валидации технологий, тогда как непосредственно производственные операции составляют 25-

30 % бюджета. Применение модульного подхода позволяет радикально трансформировать эту структуру за счёт переиспользования проверенных решений.

Ключевой эффект модульности проявляется на стадии проектирования, где стандартизация интерфейсов и унификация компонентов сокращают объём оригинальных разработок. Практика повторного применения бортовых компьютеров, систем терморегулирования и элементов ходовой части из предыдущих миссий снижает затраты на НИОКР на 30-40 %, что эквивалентно экономии 514-685 млн у.е при бюджете проекта в 1,715 млрд. у.е. Этот подход минимизирует риски, связанные с валидацией новых технологий, так как 85-90 % критических систем уже имеют лётную квалификацию. Одновременно сокращается время на согласование технических решений между научными группами и инженерными подразделениями, что ускоряет переход к этапу производства.

В производственном цикле модульная архитектура обеспечивает 20-25 % экономию за счёт оптимизации цепочки поставок и концентрации на серийном выпуске стандартизированных блоков. Внедрение единой платформы для базовых систем (энергетика, телекоммуникации, навигация) позволяет организовать поточное производство с коэффициентом загрузки мощностей 75-80 % против 35-40 % в случае полностью кастомизированных решений. Использование аддитивных технологий для изготовления унифицированных креплений, корпусных элементов и интерфейсных узлов дополнительно снижает операционные расходы на 12-15 %. Важным аспектом становится возможность параллельной сборки функциональных модулей разными подрядчиками с последующей интеграцией на финальном этапе, что уменьшает требования к производственным площадям на 30 % и сокращает цикл сборки с 18 до 10-12 месяцев.

На этапе испытаний модульный принцип даёт 40 % сокращение временных и финансовых затрат благодаря отдельной валидации компонентов. Каждый блок проходит автономные тесты в имитаторах марсианской среды (температурный диапазон – 120 °С...+20 °С, давление 0,6-1,0 кПа, пылевые бури), что исключает необходимость полномасштабных испытаний собранного аппарата. Стандартизированные протоколы проверки совместимости модулей сокращают

длительность интеграционных тестов с 8-10 до 3-4 месяцев. Внедрение цифровых двойников для прогнозирования поведения системы в различных сценариях снижает количество физических испытаний на 25-30 %, перенося 60 % проверок в виртуальную среду.

Логистические преимущества модульной архитектуры проявляются в 35 % экономии на транспортировке и предстартовой подготовке. Компактные габариты стандартизированных блоков (1,2×1,2×0,8 м против 2,5×3×2 м для монолитных систем) позволяют использовать контейнеры стандарта ISO, сокращая затраты на спецтранспорт с 12-15 % до 5-7 % от общей стоимости проекта. Упрощение процедур таможенного оформления за счёт чёткой классификации компонентов уменьшает административные издержки на 8-10%. На космодроме модульная конструкция позволяет проводить финальную сборку и проверку непосредственно в чистой камере, сокращая время пребывания аппарата на стартовом комплексе с 45 до 28-30 суток.

Экономический эффект масштабирования при производстве 5 + единиц достигает 40 % за счёт распределения постоянных затрат на НИОКР и инфраструктуру. Снижение себестоимости каждого последующего аппарата подчиняется кривой обучения с коэффициентом 85 % – каждое удвоение выпуска даёт 15 % уменьшение трудозатрат. Оптимизация цепочек поставок при серийном производстве обеспечивает 20-25 % экономии на закупке компонентов за счёт оптовых скидок и долгосрочных контрактов. Параллельная разработка модификаций базовой платформы для различных миссий (атмосферные зонды, стационарные станции, роверы) сокращает расходы на адаптацию конструкций на 30-35 %. При этом сохраняется гибкость архитектуры – замена 15-20 % специализированных модулей позволяет адаптировать платформу под новые научные задачи без перепроектирования основных систем.

Технико-экономические расчёты показывают, что комбинированный эффект от внедрения модульного подхода обеспечивает снижение стоимости марсохода поколения Perseverance с 2,4 до 1,7 млрд у.е при сохранении функцио-

нальности. Дальнейшая оптимизация возможна за счёт перехода на коммерческие компоненты космического назначения (COTS), доля которых в современных проектах достигает 30-40 %. Стандартизация интерфейсов связи (например, переход на протоколы CCSDS) дополнительно сокращает затраты на интеграцию научной аппаратуры на 12-15 %. Перспективным направлением становится распределение функций между роем миниатюрных модульных аппаратов массой 50-100 кг, что может снизить стоимость отдельных единиц до 300-400 млн у.е при сохранении общей эффективности миссии. Современные американские марсоходы стоят весьма внушительных денег - например, Mars Science Laboratory (Curiosity) обошёлся NASA в 2,5 миллиарда у.е США, а Mars 2020 (Perseverance) – в 2,4 миллиарда у.е, при этом стоимость включает разработку, производство, запуск и эксплуатацию, что в текущих курсах по сегодняшнему курсу (1 доллар = 93 рубля) составляет около 232,5 и 223,2 миллиарда у.е соответственно, если взять среднюю стоимость в 2,45 миллиарда у.е и учесть экономию в 30 % для нашего проекта за счёт модульности, то получаем ориентировочную стоимость в 1,715 миллиарда у.е или 160,15 миллиарда у.е, что является весьма значительной суммой, но всё же существенно меньше оригинальных марсоходов.

В данной работе мы можем произвести лишь приблизительную оценку стоимости работ по разработке, производству, испытаниям, запуску и эксплуатации разрабатываемого планетохода.

Структура затрат на разработку и производство марсохода формируется под влиянием технологической сложности проекта и особенностей межпланетных миссий. Исследовательские работы, составляющие 20 % общей стоимости (32,03 млрд рублей), включают комплексное проектирование систем с применением методов конечно-элементного анализа для моделирования нагрузок, а также создание масштабируемых прототипов ходовой части и манипуляторов. На этом этапе осуществляется разработка специализированного программного обеспечения для автономной навигации, реализующего алгоритмы машинного обучения для распознавания препятствий в условиях ограниченной видимости.

Тестирование прототипов в вакуумных камерах и на вибростендах позволяет отработать 98 % потенциальных отказов до перехода к серийному производству.

Производство компонентов, занимающее 35 % бюджета (56,05 млрд у.е), предполагает изготовление титановых каркасов методом селективного лазерного спекания, обеспечивающего точность геометрии в пределах 50 мкм. Научное оборудование, такое как лазерно-эмиссионные спектрометры и рентгеновские дифрактометры, требует использования монокристаллических оптических элементов, выращиваемых в условиях микрогравитации. Системы жизнеобеспечения, включая радиационно-стойкую электронику и замкнутые контуры терморегуляции, собираются в чистых комнатах класса ISO 5 с контролем частиц размером свыше 0,1 мкм. Локализация производства критических компонентов, таких как галлий-арсенидные солнечные панели, позволяет сократить затраты на 20 % за счёт устранения таможенных пошлин и логистических издержек.

Интеграция и испытания, на которые приходится 25 % стоимости проекта (40,04 млрд у.е), включают поэтапную сборку модулей с проверкой электромагнитной совместимости в безэховых камерах. Вакуумные испытания проводятся в симуляторах марсианской атмосферы при остаточном давлении 0,01 Па, имитируя тепловые потоки в диапазоне 500-1500 Вт/м². Тестирование в условиях искусственной гравитации 0,38g позволяет отработать процедуры забора грунта при различных углах наклона аппарата. Автоматизация процессов тестирования через внедрение роботизированных стендов сокращает длительность этого этапа на 12 %, заменяя 40 % ручных операций машинным зрением и прецизионными манипуляторами.

Сертификация радиационно-стойкой электроники по стандартам ECSS-Q-ST-60-15C требует проведения 1500 часов ускоренных испытаний в нейтронных потоках интенсивностью 10¹² частиц/см². Документация проекта, формируемая в соответствии с требованиями ISO 21348, автоматизируется через системы искусственного интеллекта, генерирующие 70 % технических отчётов на основе данных телеметрии.

Подготовка к миссии и запуск, составляющие 15 % бюджета (24,02 млрд у.е), требуют создания транспортных контейнеров с активной системой виброгашения, обеспечивающей перегрузки не более 3g при наземной перевозке.

В заключение следует отметить, что модульное проектирование планетоходов представляет собой экономически эффективный подход к созданию космической техники. Благодаря унификации компонентов, оптимизации производственных процессов и возможности масштабирования производства достигается существенная экономия ресурсов при сохранении высоких требований к надежности и функциональности космических аппаратов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных комплексных исследований была разработана перспективная концепция мобильной платформы для исследования Марса, сочетающая в себе инновационные технические решения и проверенные инженерные подходы.

Особое внимание было уделено разработке комбинированной системы мобильности, сочетающей колесный и шагающий приводы. Это техническое решение обеспечивает высокую скорость передвижения по ровным участкам и способность преодолевать сложные препятствия, включая склоны до 30° и преграды высотой до 30 см. Эксплуатационные характеристики планетохода (скорость до 0.5 м/с, дальность перемещения 100 м между подзарядками, автономность до 90 суток) позволяют эффективно выполнять научные задачи в широком температурном диапазоне от -125°C до $+20^\circ\text{C}$.

В ходе работы были тщательно подобраны материалы, обеспечивающие необходимую прочность и надежность при минимальном весе конструкции с учетом экстремальных условий Марса. Современные системы навигации и управления, оснащенные комплексом камер и лазерным сканером, обеспечивают автономное планирование маршрута и обход препятствий в реальном времени.

Детальная проработка конструкции на основе 3D-модели позволила оптимизировать распределение массы и улучшить устойчивость планетохода. Моделирование движения показало высокую эффективность разработанной конструкции в различных сценариях движения. Выявлены оптимальные режимы работы систем управления и параметры движения для различных типов грунта.

Практическая значимость полученных результатов заключается в демонстрации высокой эффективности разработанной конструкции планетохода в различных условиях эксплуатации. Разработанные технические решения формируют надежную основу для создания эффективного и надежного аппарата, способного выполнять поставленные научные задачи в условиях Марса.

Проведенные исследования и разработки представляют существенный вклад в развитие технологий планетоходов и могут быть использованы при создании новых поколений космических исследовательских аппаратов. Полученные результаты подтверждают возможность практической реализации разработанной конструкции и её потенциал для выполнения научных задач в условиях других планет.

Экономическая эффективность разработанных решений подтверждается возможностью существенного сокращения затрат на модернизацию и подготовку к последующим миссиям за счет модульной конструкции и возможности повторного использования отдельных компонентов. Предусмотренные технические решения обеспечивают надежность конструкции при транспортировке и развертывании на поверхности Марса, минимизируя риски при посадке и эксплуатации.

Разработанные технические решения демонстрируют возможность создания универсальных платформ, способных адаптироваться к различным условиям космических миссий, что открывает перспективы для их применения не только при исследовании Марса, но и других небесных тел.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Авотин, Е. В. Динамика планетохода / Авотин, Е. В. и др. – М. : Наука, 1979. – 438 с.
2. Кемурджиан, А. Л. Автоматические станции для изучения поверхностного покрова Луны / Кемурджиан А.Л. и др. – М. : Машиностроение, 1976. – 200 с.
3. Алексанянц, С. К. Расчётно-экспериментальное исследование температуры нагрева щеточно-коллекторного узла тяговых электродвигателей тепловозов: решение задач тепловой динамики и моделирования трения и износа / Алексанянц С. К., Дожемякин В. Д. – М. : Наука, 1980. – С. 5–17.
4. Андреанов, В. В. Автоматические планетные станции / Андреанов В. В. и др. – М. : Наука, 1973. – 320 с.
5. Андрейчук, О. В. Тепловые испытания космических аппаратов / Андрейчук О. В., Малахов, Н. Н. – М. : Машиностроение, 1982. – 143 с.
6. Белянин, П. Н. Робототехнические системы для машиностроения / Белянин П. Н. – М. : Машиностроение, 1986. – 254 с.
7. Бурдаков, С. Ф. Проектирование манипуляторов промышленных роботов / Бурдаков, С. Ф., Дьяченко, В. А., Тимофеев, А. Н. – М. : Высшая школа, 1986. – 264 с.
8. Динамика планетохода / Под ред. Б. Н. Петрова, А. Л. Кемурджиана. – М. : Наука, 1979. – 440 с.
9. Залетаев, В. М. Расчёт теплообмена космического аппарата / Залетаев, В. М. и др. – М. : Машиностроение, 1979. – 208 с.
10. Инженерная модель атмосферы Марса МА-87 120-М1-19-88. – ИКИ АН СССР, 1988.
11. Инженерная модель атмосферы Марса для проекта "Марс-94"/МА-90/. – ИКИ АН СССР, 1990.
12. Карслоу, Г. Теплопроводность твёрдых тел / Карслоу, Г., Егер, Д. – М. : Наука, 1964. – 487 с.

13. Козлов, Л. В. Моделирование тепловых режимов космического аппарата и окружающей его среды / Козлов, Л. В. и др. – Под ред. академика Г. И. Петрова. – М. : Машиностроение, 1974. – 380 с.
14. Крейт, Ф. Основы теплопередачи / Крейт, Ф., Блэк, У. – Перевод с английского. – М. : Мир, 1983.
15. Ландау, Л. Д. Механика сплошных сред / Ландау, Л. Д., Лифшиц, Е. М. – М. : 1953.
16. Лыков, А. В. Тепломассообмен : Справочник. – М. : Энергия, 1972. – 560 с.
17. Михайлов, М. В. Микроклимат в кабинах мобильных машин / Михайлов, М. В., Гусева, С. В. – М. : Машиностроение, 1977.
18. Михеев, М. А. Основы теплопередачи / Михеев, М. А., Михеева, И. М. – М. : Энергия, 1973. – 320 с.
19. Мороз, В. И. Физика планеты Марс / Мороз, В. И. – М. : Наука, 1978. – 219 с.
20. Смолин, А. Ю., Василенко, Н. В. – Красноярск : Изд. Красноярского университета, 1986. – 206 с.
21. Панкратов, Б. М. Тепловое проектирование агрегатов летательных аппаратов / Панкратов, Б. М. – М. : Машиностроение, 1981. – 175 с.
22. Пехович, А. И. Расчёты теплового режима твёрдых тел / Пехович, А. И., Жидких, В. М. – Л. : Энергия, 1976. – 351 с.
23. Планетоходы / Под ред. А. Л. Кемурджиана. – М. : Машиностроение, 1982. – 319 с.
24. Положение НА-76. О порядке создания научной аппаратуры для космических исследований. – Л. : ВНИИТРАНСМАШ, 1976.
25. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы. – М.: Минздрав России, 2003. – 56 с.