

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ОПИСАНИЕ МИССИИ	4
2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ И ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛИ	12
3. СИМУЛЯЦИЯ ПОЛЁТА	18
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	20
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	21

ВВЕДЕНИЕ

Название проекта: «To _The _Moon»
Название команды: «Мета-пуск»

Цель: создать математическую и физическую модель миссии "Аполлон-11" провести симуляцию в Kerbal Space Program и сравнить результаты моделей с данными симуляции.

Задачи:

1. Изучить технические параметры и этапы миссии "Аполлон-11".
2. Разработать математическую модель для воссоздания полета.
3. Смоделировать миссию в Kerbal Space Program.
4. Сравнить результаты моделей и симуляции.
5. Провести анализ отклонений и сделать выводы.
6. Составить отчет о проделанной работе.

Состав команды:

- Акифьев А. С. – тимлид
- Колобов В. С. – программист, KSP
- Макаров А. Ф. – физик
- Калашник В. – физик, программист, KSP
- Ефремов Е. Ю. – математик

Описание миссии "Аполлон-11"

Дата миссии: 16 июля 1969 года — 24 июля 1969 года

Цель: Первая в истории человечества высадка на Луну и возвращение экипажа на Землю.

Организация: NASA (Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства).

Предыстория

Миссия «Аполлон-11» стала историческим событием, ознаменовавшим первый пилотируемый полет на Луну. Она была частью программы «Аполлон», разработанной NASA с целью исследования Луны и других небесных тел.

Предыстория миссии «Аполлон-11»:

В 1960-х годах мир находился в состоянии Холодной войны, и космическая гонка между США и Советским Союзом была в разгаре. После успешного запуска спутника «Спутник-1» в 1957 году Советским Союзом, США стремились продемонстрировать свои технологические достижения.

Также в течение нескольких лет NASA разрабатывало технологии для осуществления лунной миссии. Это включало создание ракет, таких как «Saturn V», и лунного модуля, который должен был приземлиться на поверхность Луны.

Перед «Аполлон-11» были проведены несколько миссий, включая «Аполлон-1» (которая закончилась трагически), «Аполлон-7» (первый успешный пилотируемый полет) и «Аполлон-8» (первый пилотируемый полет вокруг Луны). Эти миссии помогли отработать технологии и процедуры, необходимые для успешного выполнения лунной миссии.

Миссия «Аполлон-11»

«Аполлон-11» — это космическая миссия, организованная NASA, ставшая первой успешной пилотируемой попыткой высадки человека на Луну. Запуск состоялся 16 июля 1969 года с космодрома Кеннеди во Флориде. Ключевой целью миссии было приземление на лунной поверхности

и проведение научных исследований, включая сбор образцов лунного грунта.

Экипаж состоял из трех астронавтов: Нила Армстронга, Эдвина Олдрина и Майкла Коллинза. 20 июля 1969 года Армстронг и Олдрин совершили высадку на Луну в районе моря Спокойствия, став первыми людьми, ступившими на её поверхность. Армстронг произнес знаменитую фразу: «Это маленький шаг для человека, но гигантский скачок для человечества».

После проведения экспериментов и сбора образцов, астронавты вернулись на Землю 24 июля 1969 года. Миссия «Аполлон-11» стала знаковым событием в истории человечества и открыла новую эру в исследовании космоса

Этапы миссии

1. Запуск

Дата и место: 16 июля 1969 года, 13:32 UTC, Космический центр имени Кеннеди, Флорида, США.

Ракета-носитель: Сатурн V.

Высота: 110,6 м.

Тяга первой ступени: 34,5 МН.

Аполлон-11 был запущен 16 июля 1969 года с космодрома Кеннеди во Флориде с помощью ракеты-носителя «Сатурн V». Основной целью миссии было доставить астронавтов на Луну и обеспечить их безопасное возвращение на Землю.

Ракета успешно вывела корабль "Аполлон-11" на околоземную орбиту на высоте примерно 185 км. После одного витка вокруг Земли был произведен маневр для перехода на траекторию к Луне (TLI, Trans-Lunar Injection).

2. Полет к Луне

Продолжительность: около 3 суток.

После выхода на траекторию к Луне от основного блока отделился третий разгонный блок ракеты-носителя. Экипаж провел проверку всех систем и скорректировал курс.

После успешного старта «Сатурн V» вывел космический аппарат на околоземную орбиту. Экипаж провел несколько часов в подготовке к

следующему этапу миссии, включая проверки систем и коррекцию орбиты.

3. Выход на лунную орбиту

19 июля 1969 года "Аполлон-11" вошел на орбиту Луны.

Орбита: эллиптическая с апогеем 120 км и перигеем 100 км.

После выполнения маневра транслунной траектории, который состоял в включении третьей ступени ракеты, Аполлон-11 направился к Луне. Этот этап полета занял около трех дней, в течение которых экипаж проводил научные эксперименты и наблюдения.

4. Посадка на Луну

Дата посадки: 20 июля 1969 года, 20:17 UTC.

Модуль: "Орёл" (Eagle).

Состав: Два астронавта — Нил Армстронг и Базз Олдрин.

Посадочная площадка: Море Спокойствия (лунная равнина).

Посадка была выполнена вручную Нилом Армстронгом после выявления сложностей с автоматической системой (опасность столкновения с камнями).

19 июля 1969 года Аполлон-11 вышел на лунную орбиту. Экипаж провел несколько маневров для стабилизации орбиты и подготовки к высадке на поверхность Луны, проверяя все системы и готовность лунного модуля «Орлан».

5. Первая высадка человека на Луну

Дата: 21 июля 1969 года, 02:56 UTC.

Первый человек: Нил Армстронг. Его слова при спуске на поверхность: "Это один маленький шаг для человека, но гигантский скачок для человечества." Базз Олдрин присоединился к Армстронгу через 19 минут.

Деятельность на Луне: Проведение научных экспериментов. Установка флага США. Сбор образцов лунного грунта (всего 21,55 кг).

Установка научных приборов: Сейсмометр. Отражатель лазерного излучения.

Продолжительность работы на поверхности: 2 часа 31 минута.

20 июля 1969 года Нил Армстронг и Эдвин Олдрин отделились от командного модуля и начали спуск на поверхность Луны. Во время посадки возникли проблемы с компьютером, но Армстронг успешно управлял модулем вручную, приземлившись в районе моря Спокойствия.

6. Возвращение с Луны

Взлет с поверхности: 21 июля 1969 года, 17:54 UTC.

Лунный модуль успешно состыковался с командным модулем "Колумбия" где оставался третий астронавт — Майкл Коллинз. После стыковки лунный модуль был отстрелен.

После успешной посадки Армстронг стал первым человеком, ступившим на Луну, произнеся знаменитую фразу: «Это маленький шаг для человека, но гигантский скачок для человечества». Астронавты провели около двух с половиной часов на поверхности Луны, собирая образцы грунта и проводя научные эксперименты.

7. Возвращение на Землю

24 июля 1969 года "Аполлон-11" вошел в атмосферу Земли и совершил приводнение в Тихом океане в 13:50 UTC. Экипаж был подобран авианосцем USS Hornet. Экипаж "Аполлона-11" Нил Армстронг — командир. Первый человек, ступивший на Луну. Базз Олдрин — пилот лунного модуля. Второй человек, ступивший на Луну. Майкл Коллинз — пилот командного модуля. Оставался на лунной орбите и обеспечивал управление модулем "Колумбия".

После завершения миссии на Луне Армстронг и Олдрин вернулись в лунный модуль, где встретились с Майклом Коллинзом. Экипаж покинул Луну 21 июля и вернулся на Землю, приземлившись в Тихом океане 24 июля 1969 года.

Технические детали миссии Космический корабль "Аполлон-11":

Командный модуль ("Колумбия"): экипажная капсула для возвращения на Землю.

Лунный модуль ("Орёл"): аппарат для посадки и взлета с Луны.

Система связи: Использовались радиосигналы и наземные станции для передачи данных, включая изображения и телеметрию.

Структура и устройство аппарата

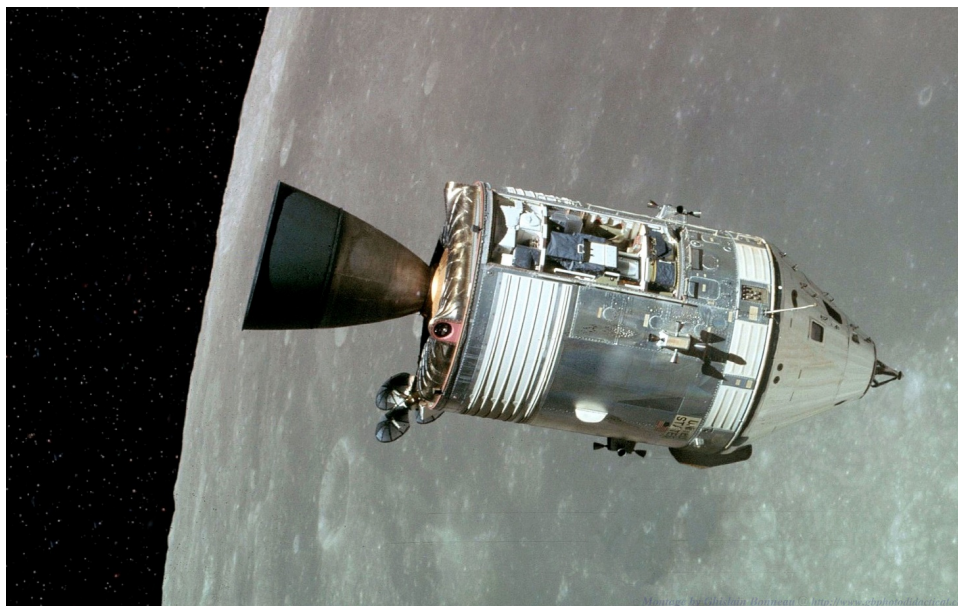


Рис. 1.1. Космический аппарат «Аполлон-11» [1]

Космический аппарат «Аполлон-11» состоял из трех основных частей: командного модуля, лунного модуля и сервисного модуля. Командный модуль имел капсулообразную форму и был спроектирован для обеспечения безопасности astronauts во время полета и при возвращении на Землю. Его герметичный корпус был изготовлен из алюминиевых сплавов и покрыт термозащитным экраном, способным выдерживать высокие температуры при входе в атмосферу. Внутри модуля размещались рабочие места для трех astronauts, системы жизнеобеспечения, управления и навигации, а также приборы связи и телеметрии.

Лунный модуль «Орлан» имел двустороннюю конструкцию, состоящую из посадочного и восходящего отсеков. Посадочный отсек был предназначен для высадки на поверхность Луны, а восходящий — для возвращения astronauts на орбиту. Корпус модуля был выполнен из алюминиевых сплавов и покрыт теплоизоляционными материалами для защиты от экстремальных температур. Внутри модуля находились рабочие места для двух astronauts, системы управления, а также оборудование для проведения научных экспериментов и сбора образцов лунного грунта. Сервисный модуль располагался за командным модулем и содержал двигательные установки, системы электроснабжения и жизнеобеспечения. Он обеспечивал необходимые ресурсы для полета, включая кислород, воду и электроэнергию. Сервисный модуль также был осна-

щен солнечными батареями, которые обеспечивали энергией все системы аппарата во время полета к Луне.

Основные параметры:

Общая масса на старте: 2 940 т.

Дальность до Луны: 384 400 км.

Ракета-носитель типа Сатурн V



Рис. 1.2. Ракета-носитель «Сатурн V» [2]

Ракета-носитель «Сатурн V» — это трехступенчатая ракета, разработанная для программы «Аполлон», предназначенная для вывода космического аппарата на орбиту Луны. «Сатурн V» была одной из самых мощных ракет в истории, способной доставить полезную нагрузку весом до 140 тонн на низкую околоземную орбиту. Общая высота ракеты составляла около 110 метров, а стартовая масса — 2 900 тонн. Система двигателей обеспечивала необходимую тягу для достижения скорости, необходимой для полета к Луне.

Первая ступень

Первая ступень ракеты «Сатурн V» состояла из центрального блока и трёх мощных двигателей F-1, которые использовали жидкое топливо (керосин и жидкий кислород). Основная задача первой ступени заключалась в обеспечении первоначального набора скорости и вывода ракеты на высоту, достаточную для включения второй ступени. Эта ступень обеспечивала мощный старт, необходимый для преодоления силы тяжести Земли.

Вторая ступень

Вторая ступень, оснащённая пятью двигателями J-2, также использовала жидкое топливо. Её задача заключалась в продолжении разгона ракеты и выводе аппарата на низкую околоземную орбиту. Эта стадия была критически важной для стабилизации полета и подготовки к следующему этапу миссии.

Третья ступень

Третья ступень, также с двигателем J-2, включалась после отделения второй ступени. Она выводила ракету и полезную нагрузку на орбиту вокруг Земли и готовила аппарат к следующему этапу миссии — выходу на траекторию к Луне. На этой стадии происходила проверка систем и подготовка к маневру, который позволял покинуть орбиту Земли.

Четвёртая ступень (лунный переход)

Четвёртая ступень, или лунный переходный блок, была ключевой для выполнения маневра выхода на лунную орбиту. Её основная задача заключалась в том, чтобы обеспечить необходимую скорость и направить аппарат на траекторию к Луне.

После выхода на околоземную орбиту четвёртая ступень включалась для выполнения маневра, который отправлял космический аппарат в сторону Луны, обеспечивая успешное выполнение миссии по высадке на её поверхность.

Характеристики ракеты-носителя "Сатурн V":

1. Тип: Многоступенчатая ракета
 2. Количество ступеней: 3
 3. Высота: около 110,6 м
 4. Диаметр: 10,1 м (центральный блок) и 6,4 м (боковые ускорители)
 5. Масса при старте: около 2 800 тонн
 6. Топливо:
 - Для первой ступени: керосин (RP-1) и жидкий кислород (LOX).
 - Для второй и третьей ступеней: жидкий водород (LH2) и жидкий кислород (LOX).
 7. Тяга первой ступени: около 34 000 кН
 8. Полезная нагрузка: до 45 000 кг (лунный модуль "Аполлон" и командный модуль).
- Разгонный блок: использовался для выхода на орбиту Луны, выполняя маневр для отделения лунного модуля и обеспечения его посадки на поверхность Луны.

Значение миссии

Миссия "Аполлон-11" стала важнейшей вехой в истории освоения космоса. Она продемонстрировала возможности человека и техники, усилила научные исследования Луны и заложила основу для дальнейших исследований.

Это достижение до сих пор остается символом триумфа человеческой науки и технологий.

Физическая и математическая модели первого этапа

1 Физическая модель

Физическая модель описывает запуск ракеты и её вывод на орбиту, опираясь на законы физики. Модель отвечает на вопросы, какие силы действуют на ракету, как они влияют на её движение и как ракета преодолевает атмосферу Земли.

1.1 Основные этапы:

1. Работа ракеты-носителя (Сатурн V):

- Движение ракеты начинается под действием тяги двигателей.
- Гравитация Земли тянет ракету вниз.
- Сопротивление воздуха замедляет её движение.

2. Ускорение и рост скорости:

- На старте ракета преодолевает силу тяжести ($F_{\text{грав}}$) и сопротивление воздуха ($F_{\text{сопр}}$).
- Тяга двигателей ($F_{\text{тяга}}$) должна быть больше суммы этих сил, чтобы ракета начала подниматься.

3. Изменение массы ракеты:

- По мере сжигания топлива масса ракеты уменьшается, что увеличивает её ускорение.

4. Выход из атмосферы:

- Сопротивление воздуха уменьшается с высотой, так как плотность атмосферы снижается.

5. Вывод на орбиту:

- После завершения работы первой и второй ступеней ракета достигает достаточной горизонтальной скорости для выхода на орбиту Земли.

1.2 Основные физические законы

- Закон всемирного тяготения:

$$F_{\text{грав}} = \frac{GM_{\text{Кер}}m}{r^2}$$

где $M_{\text{Кер}}$ — масса планеты, r — расстояние от центра планеты, G - гравитационная постоянная, m - масса ракеты

- Сила тяги двигателя:

$$F_{\text{тяги}} = \dot{m} \cdot U$$

где $\dot{m} = \frac{\Delta m}{\Delta t}$ — расход топлива, U — скорость истечения газа.

- Сопротивление воздуха:

$$F_{\text{сопр}} = \frac{1}{2} C \rho v^2 S_{\text{сеч}}$$

где C — коэффициент лобового сопротивления, ρ — плотность среды, v — скорость ракеты, $S_{\text{сеч}}$ — площадь поперечного сечения

Плотность среды ρ будем рассчитывать по формуле Менделеева-Клапейрона:

$$\rho = \frac{p \cdot M}{R \cdot T},$$

где p - атмосферное давление на высоте h [Па], M - молярная масса воздуха ($0.029 [\frac{\text{кг}}{\text{моль}}]$), R - универсальная газовая постоянная (8.31), T - абсолютная температура (для упрощения 300 [K])

Формула для вычисления атмосферного давления:

$$p = p_0 \cdot e^{\frac{-M \cdot g \cdot h}{R \cdot T}},$$

где p_0 - атмосферное давление на уровне моря (10^5 [Па]), e - число Эйлера (примерно 2,7183), M - молярная масса воздуха [$\frac{\text{кг}}{\text{моль}}$], g - ускорение свободного падения (примерно 9,81 [$\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$]), h - высота ракеты над уровнем моря [м], R - универсальная газовая постоянная, T - температура [K]

На основе выше перечисленных формул составим общую формулы для силы сопротивления:

$$\begin{cases} p = p_0 \cdot e^{\frac{-M \cdot g \cdot h}{R \cdot T}} \\ \rho = \frac{p \cdot M}{R \cdot T} \end{cases} \Rightarrow \rho = \frac{p_0 \cdot e^{\frac{-M \cdot g \cdot h}{R \cdot T}} \cdot M}{R \cdot T}$$

$$\begin{cases} \rho = \frac{p_0 \cdot e^{\frac{-M \cdot g \cdot h}{R \cdot T}} \cdot M}{R \cdot T} \\ F_{comp} = C \cdot \frac{\rho v^2}{2} \cdot S, \end{cases} \Rightarrow F_{comp} = C \cdot \frac{p_0 \cdot e^{\frac{-M \cdot g \cdot h}{R \cdot T}} \cdot M}{2} \cdot v^2 \cdot S_{сеч}$$

- Второй закон Ньютона:

$$F_{рез} = m \cdot a$$

$$F_{рез} = F_{тяги} + F_{сопр} + F_{грав}$$

где $F_{рез}$ — результирующая сила, m — масса ракеты, a — ускорение.
Из всего, что было ранее, получаем:

$$F_{рез} = U \cdot \mu + \frac{G \cdot M \cdot m}{(R_{Ker} + h)^2} + C \cdot \frac{p_0 \cdot e^{\frac{-M \cdot g \cdot h}{R \cdot T}} \cdot M}{2} \cdot v^2 \cdot S_{сеч}$$

В качестве начала отсчёта возьмём центр планеты.

Также будем учитывать сгораемое топливо и отсоединение ступеней при изменении массы ракеты:

$$m = \begin{cases} m_0 - \mu_0 \cdot t_0 \\ m_1 - \mu_1 \cdot (t - t_0) \end{cases}$$

где

- m_0 и m_1 — массы ракеты при взлёте и после отсоединения ступеней [кг];
- μ_0 и μ_1 — расход топлива первой и второй ступени [кг/с];
- t_0 и t — время работы ступеней и время после их отсоединения [с].

используем формулу по выведению значения расхода топлива из силы тяги и удельного импульса:

$$\mu = \frac{F_{тяги}}{I_{уд}} = \dot{m}$$

При полёте надо также учитывать, что ракета летит по дуге. С временем ракета будет отходить от вертикального положения и "наклоняться" ближе к горизонту. Угол наклона α относительно оси ординат зависит от времени:

$$\alpha(t) = \alpha_0 + \Delta\alpha \cdot t,$$

где

α_0 - изначальный угол наклона ракеты[рад], $\Delta\alpha$ - изменения угла наклона $[\frac{\text{рад}}{\text{с}}]$, t - время [с]

Теперь мы можем составить систему дифференциальных уравнений в нормальном виде Коши:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x} = v_x \\ \dot{y} = v_y \\ \dot{v}_x = \frac{(U \cdot \mu - C \cdot \frac{p_0 \cdot e^{-\frac{M \cdot g \cdot h}{R \cdot T}} \cdot M}{2 \cdot R \cdot T} \cdot S_{\text{сеч}}) \cdot \cos(\alpha_0 + \Delta\alpha \cdot t)}{m} \\ \dot{v}_y = \frac{(U \cdot \mu - C \cdot \frac{p_0 \cdot e^{-\frac{M \cdot g \cdot h}{R \cdot T}} \cdot M}{2 \cdot R \cdot T} \cdot S_{\text{сеч}}) \cdot \sin(\alpha_0 + \Delta\alpha \cdot t) - \frac{G \cdot M \cdot m}{(R_{\text{Кер}} + h)^2}}{m} \end{array} \right.$$

Решать данную систему мы будем с помощью численного метода Эйлера решения дифференциальных уравнений.

Он заключается в разбиении интервала времени на отрезки с определенной длиной, после чего на основании этих интервалов вычисляются приближённые значения x, y, v_x, v_y .

Симуляция полёта

Для симуляции полёта мы использовали программу Kerbal Space Program, дополненную модификацией Корепнісус, которая позволила нам воссоздать более точные условия запуска ракеты и параметры миссии. Корепнісус сыграл ключевую роль в настройке планетарной системы и орбитальных характеристик, максимально приближая их к реальным данным и обеспечивая высокую степень достоверности модели.

Из-за особенностей работы Kerbal Space Program мы внесли некоторые упрощения в конструкцию ракеты. В частности, ракету-носитель ограничили тремя ступенями, что соответствует базовым требованиям миссии, но при этом отличается от оригинального дизайна. Кластер двигателей первой ступени был представлен тремя силовыми установками, что обеспечило необходимую тягу для старта и набора скорости.

В остальном симуляция повторяла ключевые элементы известной космической миссии, включая этапы выведения на орбиту, коррекцию траектории, выполнение манёвров на трансферной орбите к Луне, а также посадку на её поверхность. Все эти этапы были выполнены в строгом соответствии с законами орбитальной механики и физики.

Благодаря этим настройкам мы смогли воссоздать динамику полёта и последовательность операций, близкие к реальной миссии, и получить ценный опыт в моделировании сложных космических задач.

Ниже представлены графики зависимости:

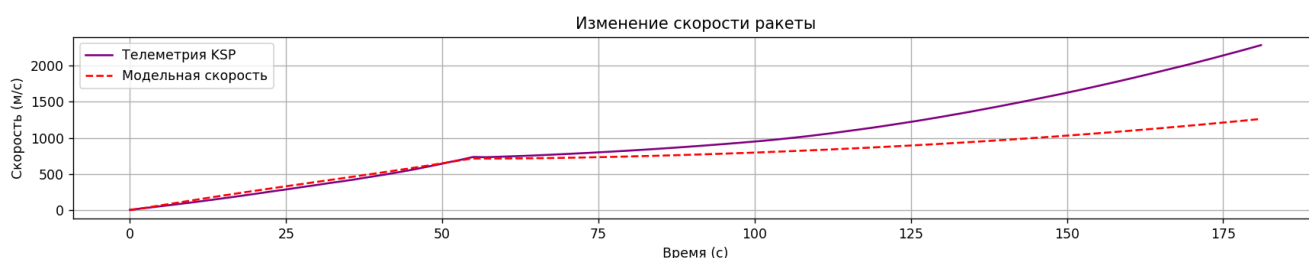


График зависимости скорости от времени

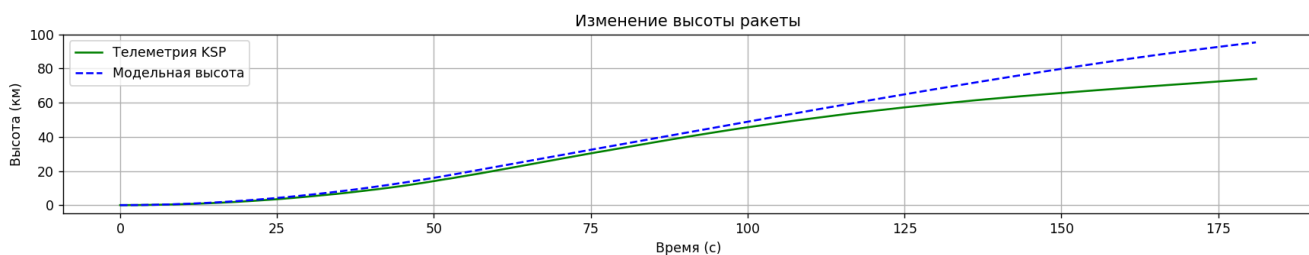
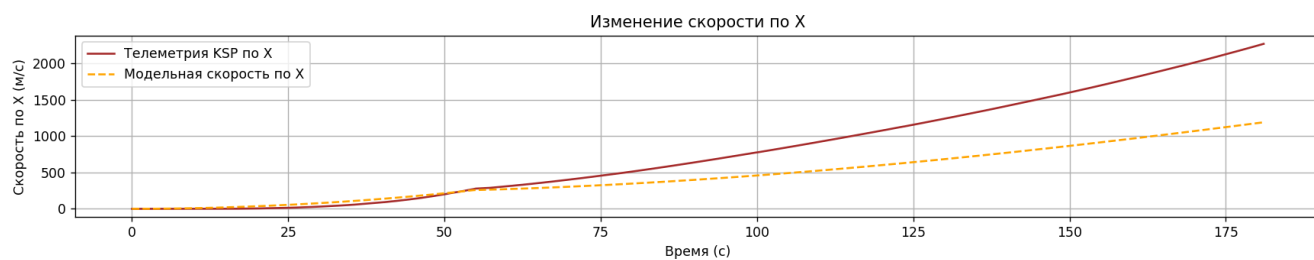
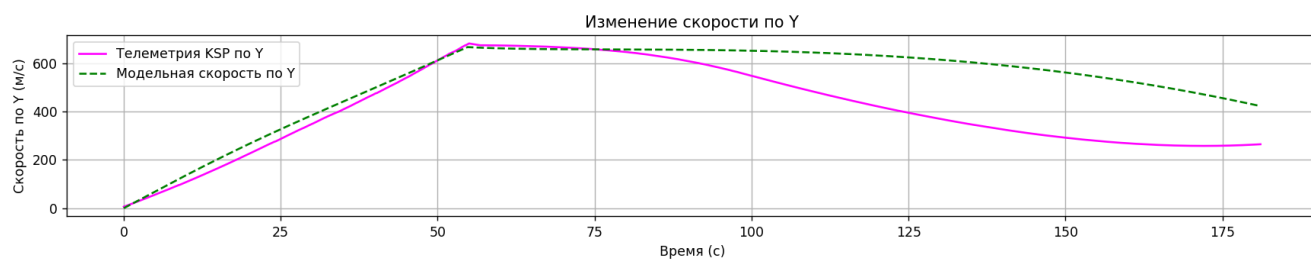


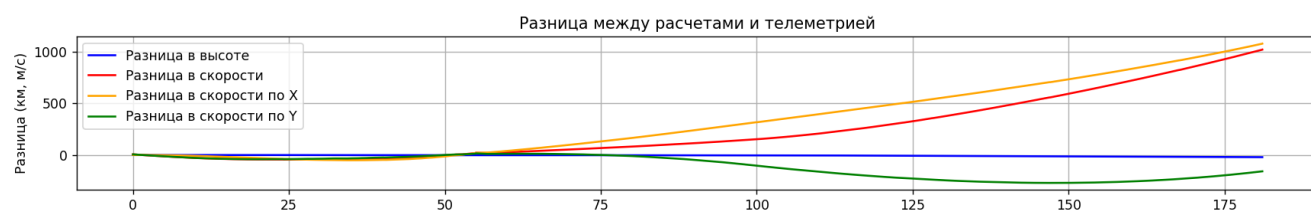
График зависимости высоты от времени



Изменение скорости по X



Изменение скорости по Y



Разница между моделью и телеметрией

Подробности реализации можете найти по ссылке:
<https://github.com/Valerka2307/Apollon-11/>

Заключение

Мы успешно воссоздали запуск, полёт и посадку на Луну одной из самых знаковых космических миссий в истории человечества. Для этого нам пришлось провести серьёзную подготовительную работу: мы изучили и проанализировали данные NASA, которые предоставили нам необходимые параметры реальных миссий. Чтобы точно смоделировать процесс, мы освоили навыки работы в Kerbal Space Program, которая позволяет воспроизводить реалистичные сценарии космических полётов.

Кроме того, нам пришлось глубже погрузиться в базовые принципы физики и математики, связанные с запуском ракет, включая расчёты траекторий, управление скоростью, оптимизацию топлива и манёвры на орбите. Это потребовало изучения основ динамики космических аппаратов, законов Ньютона, а также методов расчёта гравитационного взаимодействия и планирования мягкой посадки на поверхность Луны.

Итогом стало не только успешное воспроизведение миссии, но и углублённое понимание процессов, которые стоят за выдающимися достижениями космической науки и техники.

Источники

Литература

1. Куренков В. И. Основы проектирования ракет-носителей. — М.: Издательство Машиностроение, 2020. — 345 с.
2. Панкратов Б. М. Спускаемые аппараты. — М.: Издательство Наука, 2018. — 256 с.
3. Документация библиотеки matplotlib. URL: <https://matplotlib.org/stable/index.html>
4. Браун, К. Р. Аполлон: история программы. — Москва: Эксмо, 2015. — 320 с.
5. NASA. Apollo 11 Mission Overview [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.nasa.gov/mission_pages/apollo/missions/apollo11.html

Работа с ПО

1. Документация библиотеки KRPC. URL: <https://krpc.github.io/krpc/>
2. Документация библиотеки numpy. URL: <https://numpy.org/doc/>
3. Kerbal Space Programming. [Видео ресурс]. URL: https://youtube.com/playlist?list=PL9hNFus3sjE6ytss60WutImLSb6_PQjdL&si=qN6nuuMcfJ5D_qZh

Программное обеспечение

1. Kerbal Space Program. [Электронный ресурс]. URL: https://store.steampowered.com/app/220200/Kerbal_Space_Program/
2. Kopernicus. [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/Kopernicus/Kopernicus>

Наш GitHub

URL: <https://github.com/Valerka2307/Apollon-11>