**Московский Авиационный Институт** 

**(Национальный исследовательский университет)**

**Проект по курсу**

**«Введение в авиационную и ракетно-космическую технику»**

**I семестр**

**“Миссия «Спутник-5»”**

**Студенты:** Широбоков Д. А., Волоснев Ф.А., Рахимов М.Ю., Клещев Д.О.

**Группа:** М8О-101БВ-24

**Руководители:** Тимохин М. Ю., Кондаратцев В. Л.

**Оценка** \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ **Дата защиты « »** \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 2024 г.

Подпись преподавателя: \_\_\_\_\_\_

Москва, 2024

Оглавление

[1. Введение 3](#_Toc185464280)

[2. История и описание миссии 5](#_Toc185464281)

[3. Физико-математическая модель 16](#_Toc185464282)

[4. Симуляция KSP 17](#_Toc185464283)

[6. Заключение 33](#_Toc185464284)

[7. Список использованных источников 35](#_Toc185464285)

[ПРИЛОЖЕНИЕ А 36](#_Toc185464286)

[ПРИЛОЖЕНИЕ Б 39](#_Toc185464287)

# Введение

**Тема:**

Спутник-5 — советская космическая миссия, запущенная 19 августа 1960 года, впервые успешно вернувшая живых существ из космоса, включая собак Белку и Стрелку.

**Цель:**

Сравнить полёт из KSP (Kerbal Space Program) c составленной физико-математической моделью полета.

**Задачи миссии:**

1. Изучить доступную информацию о реальном полёте.

2. Создать оригинал или приближённую копию ракеты в KSP как у советской миссии.

3. Реализовать запуск ракеты в KSP.

4. Собрать и обработать данные из KSP

5. Сделать физико-математическую модель полёта ракеты.

6. Написать программную реализацию обработки и сбора данных из KSP и физико-математическую модели, создать графики на их основе.

7. Проанализировать полученные графики и сделать вывод.

**Название команды**: «ITC»

**Состав команды и роли её участников:**

* Широбоков Дмитрий Андреевич (101БВ) - Тимлид, моделирование в Kerbal Space Program (KSP)
* Волоснев Федор Антонович (101БВ) – Физик, математик, программист
* Рахимов Михаил Юрьевич (101БВ) - Программист, ответственный за создание видео – презентации и отчета
* Клещев Даниил Олегович (101БВ) – Ответственный за поиск достоверной информации, помощь в создании отчета и видео - презентации

1. История и описание миссии

**Краткая предыстория:**

Космическая эра началась с запуска Спутника-1 в 1957 году, ознаменовавшего первые шаги человечества в освоении космоса. В последующие годы СССР провел серию миссий, направленных на изучение орбитального полета, включая запуск живых существ, таких как собаки, для оценки влияния космоса на организм. Спутник-5 стал кульминацией этих экспериментов, впервые вернув живых существ из космоса на Землю. Между началом космической эры и миссией Спутник-5 было запущено 10 космических аппаратов:

#### 1. Спутник-1 (4 октября 1957 года)

Спутник-1 стал первым искусственным спутником Земли и ознаменовал начало космической эры. Аппарат представлял собой алюминиевую сферу диаметром 58 см и весом 83,6 кг, оснащенную четырьмя антеннами для передачи радиосигналов. Основной задачей миссии было подтверждение возможности вывода объекта на орбиту. Запуск стал научной и политической победой СССР, демонстрируя технологическое превосходство страны. Спутник-1 находился на орбите 92 дня, совершив 1 440 оборотов вокруг Земли, после чего вошел в атмосферу и сгорел. Его радиосигналы, передаваемые на частотах 20,005 и 40,002 МГц, принимались по всему миру, предоставляя данные об условиях верхних слоев атмосферы.

#### 2. Спутник-2 (3 ноября 1957 года)

На борту Спутника-2 находилась собака Лайка — первое живое существо, отправленное на орбиту. Этот спутник весом 508 кг был оснащен герметичной кабиной с системой жизнеобеспечения. Целью миссии было изучение воздействия невесомости и космического излучения на организм. Лайка погибла через несколько часов из-за перегрева, однако миссия предоставила важные данные, которые легли в основу дальнейших разработок. Спутник оставался на орбите 162 дня.

#### 3. Спутник-3 (15 мая 1958 года)

Спутник-3 был первым полноценным научным спутником СССР, предназначенным для изучения Земли и околоземного пространства. Аппарат весил 1 327 кг и был оборудован научной аппаратурой для исследования радиационных поясов, космического излучения, магнитного поля и микрометеоритов. Спутник представлял собой герметичную капсулу с установленными датчиками и системами передачи данных.

Запуск был успешным, хотя из-за технических неисправностей не удалось записать часть данных на магнитную ленту. Тем не менее, с помощью радиосигналов были получены важные сведения, включая первые измерения интенсивности радиационных поясов Земли, которые позднее стали известны как пояса Ван Аллена. Спутник-3 находился на орбите более полутора лет и сгорел в атмосфере в апреле 1960 года.

#### 4. Спутник-4 (15 мая 1960 года)

Этот аппарат был разработан для отработки технологий, необходимых для возвращения живых существ с орбиты, включая системы жизнеобеспечения и термозащиты. Аппарат весил 4 540 кг и включал в себя герметичную кабину, которая могла возвращаться на Землю.

Спутник-4 достиг орбиты, но из-за ошибки в системе ориентации капсула не смогла войти в атмосферу по заданной траектории и осталась на орбите. Несмотря на это, миссия предоставила ценную информацию о поведении систем в космосе и была важным этапом на пути к успешной миссии Спутник-5.

#### 5. Луна-1 (2 января 1959 года)

Луна-1 стала первым аппаратом, достигшим окрестностей Луны. Его целью было изучение космического пространства и демонстрация возможности достижения Луны. Аппарат весом 361 кг был оснащен приборами для измерения солнечного ветра, магнитного поля и микрометеоритов.

Луна-1 прошла в 5 995 км от поверхности Луны и стала первым искусственным объектом, покинувшим земное гравитационное поле. Аппарат не смог достичь поверхности Луны из-за ошибки в расчетах траектории, но передал данные, которые стали важными для понимания космического пространства.



Рис. 1 - Луна-1

#### 6. Луна-2 (12 сентября 1959 года)

Луна-2 стала первым космическим аппаратом, достигшим поверхности Луны. Вес аппарата составлял 390 кг. Он был оснащен приборами для исследования солнечного ветра, радиации и магнитного поля.

После 33,5 часов полета Луна-2 столкнулась с поверхностью Луны, предоставив доказательства отсутствия атмосферы и магнитного поля у спутника Земли. Миссия также включала выброс флагов СССР на поверхность Луны в виде металлических шаров.

#### 7. Луна-3 (4 октября 1959 года)

Луна-3 стала первым аппаратом, передавшим изображения обратной стороны Луны. Ее цель заключалась в фотографировании и исследовании неизведанной области. Вес аппарата составлял 278,5 кг, а его система фотосъемки и передачи данных была уникальной для своего времени.

Аппарат сделал 29 фотографий обратной стороны Луны, из которых 17 были четкими. Эти снимки позволили ученым обнаружить новые объекты, такие как Моря Мечты и Моря Москвы.

#### 8. Космос-1 (25 марта 1960 года)

Космос-1 был экспериментальным аппаратом, созданным для отработки технологий управления и передачи данных на орбите. Это была первая миссия из серии "Космос". Аппарат весил 1 473 кг и был оснащен усовершенствованной системой ориентации.

Основной задачей миссии стало тестирование новых приборов и систем, необходимых для будущих исследований. Космос-1 находился на орбите до 30 апреля 1960 года, передав данные, которые помогли улучшить конструкции спутников.

#### 9. Луна-4 (15 апреля 1960 года)

#### Луна-4 была частью серии аппаратов для исследования Луны. Основной целью миссии было достижение лунной поверхности с мягкой посадкой. Аппарат массой около 1 500 кг был оборудован системой управления, позволяющей корректировать траекторию.

#### Запуск прошел успешно, но из-за ошибки в системе ориентации Луна-4 не смогла достичь Луны и вышла на орбиту, близкую к солнечной. Несмотря на неудачу, миссия позволила отработать новые технологии управления межпланетными аппаратами.

#### 10. Месяц-1 (июль 1960 года)

#### Этот экспериментальный аппарат, позднее получивший обозначение Космос-2, был разработан для проверки технологий управления космическими аппаратами на больших расстояниях. Миссия включала изучение радиосвязи и тестирование новых систем жизнеобеспечения для будущих миссий.

#### Аппарат массой около 900 кг провел на орбите более месяца, передавая ценные данные о радиосвязи в условиях космоса и поведении систем жизнеобеспечения. Его вклад стал важным для подготовки следующего этапа в космической программе СССР.

**Миссия Спутник-5:**

Старт состоялся с космодрома Байконур на ракете-носителе "Восток". Полет прошел без значительных отклонений от запланированной траектории. Спутник-5 был выведен на орбиту с параметрами 324 × 287 км, где он провел 17 витков вокруг Земли за 25 часов 18 минут.



Рис. 2 - Белка и Стрелка

На борту находились две собаки — Белка и Стрелка, а также 40 мышей, две крысы и семена растений. Во время полета датчики фиксировали физиологические параметры животных. Ученые наблюдали за их состоянием в условиях невесомости, а также за их реакцией на старт, полет и посадку.

Белка и Стрелка адаптировались к невесомости, однако у Белки на одном из витков наблюдалась рвота — важный показатель реакции организма на новые условия. После этого состояние собак стабилизировалось.

На орбите аппаратура фиксировала данные о космическом излучении, микрогравитации и воздействии невесомости на организм. Семена растений, бактерии и грибы также подвергались исследованию на мутации и изменения в биологическом цикле.

После выполнения запланированных витков система спуска была активирована. Спускаемая капсула вошла в плотные слои атмосферы, успешно выдержав перегрузки и температуру до 3 000°C. Спутник приземлился в заданной точке на территории СССР. Собаки, мыши и другие организмы были обнаружены в хорошем состоянии.

**Планирование и разработка «Спутник-5»:**

Разработка Спутника-5 началась на основе предыдущего опыта советской космической программы. Проектирование аппарата велось в ОКБ-1 под руководством Сергея Королева. За основу был взят аппарат, используемый в миссии Спутник-4, с существенными доработками.

Спутник-5 представлял собой космический корабль, построенный на базе корабля-спутника 1К. Он включал герметичную кабину для животных, снабженную системами жизнеобеспечения, вентиляции и терморегуляции. Особое внимание было уделено прочности конструкции и теплозащите спускаемого модуля, чтобы обеспечить безопасность при входе в плотные слои атмосферы.

Кабина была оборудована для комфортного пребывания собак: система подачи кислорода, автоматическая подача пищи и воды, а также устройства для удаления отходов жизнедеятельности. Контроль за состоянием животных осуществлялся с помощью датчиков, измеряющих температуру тела, частоту сердечных сокращений и дыхание.

Кроме систем жизнеобеспечения, аппарат был оборудован приборами для изучения космического излучения, магнитных полей, невесомости и воздействия радиации. На борту также находились семена растений, бактерии и грибы для изучения их поведения в условиях космоса.

Ключевой задачей планирования было отработать весь цикл космического полета:

- Запуск аппарата на стабильную орбиту;

- Проведение наблюдений за состоянием живых организмов;

- Управляемый спуск и точная посадка в заданной зоне.

Тестирование всех систем проходило в несколько этапов. Сначала проводились наземные испытания систем кабины и теплозащиты, затем — орбитальные испытания с макетами или животными.

**Научные цели и задачи реальной миссии:**

1. Изучение воздействия невесомости

Миссия позволила впервые изучить влияние длительного пребывания в космосе на физиологическое состояние живых организмов. Особое внимание уделялось реакции нервной, дыхательной и сердечно-сосудистой систем.

1. Отработка технологий возвращения

Отработаны системы точного управления спуском, парашютной посадки и теплозащиты, которые в дальнейшем использовались в миссии Юрия Гагарина.

1. Исследование радиационного воздействия

Была собрана информация о воздействии космического излучения на живые организмы и электронику. Полученные данные использовались для разработки защиты будущих пилотируемых кораблей.

1. Биологические эксперименты

Проведенные эксперименты с растениями и микроорганизмами показали, что влияние космоса может вызывать мутации, что стало основой для дальнейших исследований.



Рис. 3 - Пуск ракеты-носителя 8К72

**Манёвры и полёт ракеты “Восток-К”:**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Маневр | Дата | Перицентр × Апоцентр |
| Старт ракеты-носителя “Восток-К” с Байконура | 19 августа  1960 года | 0 km ×  0 km |
| Отделение боковых ускорителей | 19 августа  1960 года | 85 km ×  0 km |
| Вывод третьей ступени для завершения подъема | 19 августа  1960 года | 160 km ×  0 km |
| Достижение расчетной орбиты | 19 августа  1960 года | 287 km ×  324 km |
| Автономное движение по орбите | 19-20 августа  1960 года | 287 km ×  324 km |
| Торможение для схода с орбиты | 20 августа  1960 года | 250 km ×  250 km |

**Устройство ракеты “Восток-К” из реальной миссии:**

Ракета-носитель "Восток-К 8К72" — это модификация ракеты Р-7, предназначенная для запуска первых спутников и пилотируемых космических аппаратов в рамках советской космической программы. Рассмотрим устройство ракеты в полном объеме.

**Общее описание ракеты "Восток-К 8К72":**

* **Тип ракеты:** Ракета-носитель
* **Применение:** Запуск спутников и пилотируемых космических аппаратов (миссия "Восток", "Спутник-5")
* **Производитель:** ОКБ-1 (Конструкторское бюро Сергея Королева)
* **Год первого полета:** 1957 (модификация Р-7)

**Габаритные размеры:**

* **Длина:** 34,3 м
* **Диаметр:** 2,99 м (на базе основной ступени)
* **Диаметр первой ступени:** 2,99 м
* **Размах стабилизаторов:** 6 м
* **Масса:** 280 т (снаряженная)

**Ступени:**

* **Первая –** 4 блока. В каждом по двигателю РД-107, горючее - керосин
* **Вторая –** центральный блок. Двигатель РД-108, горючее - керосин
* **Третья – б**лок Е, расположен над центральным, двигатель РД-0109

**Характеристики и производительность:**

* Скорость старта: около 7 км/с.
* Максимальная скорость на орбите: до 8 км/с.
* Перигей орбиты: около 200 км.
* Апогей орбиты: 800 км.

**Параметры топливных систем**

Жидкое топливо: Ракетное топливо, состоящее из керосина (ТГ-02) и жидкого кислорода (ЖК), использовалось в качестве топлива для всех ступеней ракеты.

* **Объем топливных баков:** 
  + - Первая ступень: 187 т топлива.
    - Вторая и третья ступени: около 40 т топлива.
* **Управление и навигация:**
  + - Система управления: Автопилот на основе гироскопов и системы коррекции с использованием сигналов от наземных станций.
    - Навигация: Коррекция траектории выполнялась по командам с Земли, что позволяло запускать ракеты с высокой точностью.
* **Параметры стартовой платформы и пуск:**
  + - Стартовая площадка: Байконур, площадка №1 (была адаптирована для ракеты Р-7).
    - Процесс старта: Ракета-носитель вывозилась на стартовую платформу, где происходила заправка топливом, а также запуск ракеты.
* **Технологические особенности:**
  + - Первая ступень (Р-7) в сочетании с боковыми ускорителями позволяла значительно повысить тягу и ускорение ракеты на первых этапах полета.
    - Устойчивость ракеты обеспечивалась с помощью стабилизаторов и системы гироскопов, что позволяло корректировать направление и обеспечивать точный запуск.

1. Физико-математическая модель
2. Симуляция KSP
3. **Постройка ракеты**  
   Игра «Kerbal Space Program» относится к жанру реалистичных симуляторов, однако совсем не содержит деталей реальных ракет. По этой причине было принято решение составить реальные двигатели **РД-107, РД-108 и РД-0109** из существующих в игре.

Для воссоздания ракеты на основе «Восток-Л» (8К72), использовавшейся в программе запуска первого искусственного спутника, были использованы следующие элементы KSP:

* **РД-107:** построен из двух двигателей «Стукач» (Swivel) и четырех «Факел» (Thud).
* **РД-108:** состоит из четырех «Стукачей» и четырех «Факелов».
* **РД-0109 (третья ступень):** представлен двигателем «Вертлявый» (Terrier).

Цель работы состоит в сравнении физико-математической модели и симуляции полета в игре «Kerbal Space Program», а не в моделировании реального космического аппарата, поэтому вместо нечто похожего на корабль «Спутник-5» используется Командный отсек Mk1-3, дабы не усложнять процесс постройки ракеты в игре.

Из-за того, что один двигатель реальной ракеты составлен из нескольких двигателей в KSP, то значения сил тяги, расхода топлива и сухих масс ступеней отличаются от реальных. Однако, чтобы проверить правильности физико-математической модели мы сравниваем ее с KSP, следовательно все параметры ракеты будем подставлять из KSP.

Также из-за новых значений сил тяги, масс топлива и др время отсоединения ступеней отличается от реального. Однако у нас получилось смоделировать выход на орбиту, приближенной к реальной.

1. **Автопилот**

Планировалось, что автопилот будет использовать модификацию Mechjeb, предоставляющую возможность легко вывести корабль на нужную орбиту по ее параметрам. Однако из-за низкого центра масс полеты с Mechjeb были не стабильны, ракету переворачивало хвостом вверх во время начала гравитационного поворота, поэтому было принято решение использовать модификацию kRPC, которая позволяет управлять «Kerbal Space Program» с помощью скрипта, написанного с использованием библиотеки krpc. Скрипт подключается к серверу, работающему в игре, и использует его для управления ракетой и взаимодействия с ней. Был выбран язык программирования Python из-за его простого синтаксиса, что позволило значительно упростить написание автопилота.

При достижении высоты в 250 метров начинается гравитационный поворот, цель которого эффективно использовать гравитационное поле планеты для набора скорости и повышения высоты. Угол тангажа высчитывается функцией

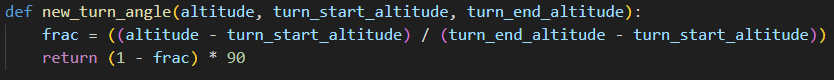
**new\_turn\_angle**.

Рисунок 1 Функция вычисления угла гравитационного поворота

В момент, когда апогей достигает заданной высоты орбиты, код рассчитывает необходимую корректировку скорости (функция delta\_v) для достижения заданной орбиты. Это достигается с помощью уравнения **Ви-Вива**.

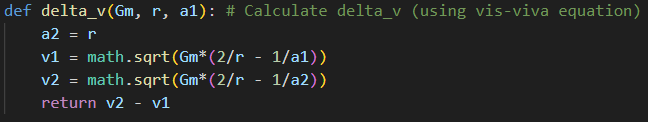


Рисунок 2 Функция вычисления изменения скорости

Он также рассчитывает время работы двигателя, необходимое для этого маневра с помощью формулы Циолковского.

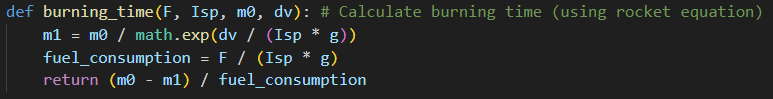
С помощью уравнений 1, 2, 3 написана функция burning\_time, возвращающая время, требуемое для совершения маневра.

Рисунок 3 Функция вычисления времени работы двигателя для маневра

При достижении апогея автопилот включает двигатель на расчетное время выполнения маневра, выключает его и прекращает свою работу при приближении перигея к заданной высоте орбиты.

1. **Логирование**

Преимуществом использования kRPC вместо Mechjeb является возможность гибкой настройки логирования: Mechjeb сохраняет данные полета в csv-файл, в то время как скрипт с krpc никак не ограничивает программиста в выборе. Для удобства построения графиков было выбрано сохранение данных полета в json-файл. В течение полета сохраняются следующие параметры: время, высота, модуль вектора скорости, масса аппарата, угол тангажа, сила тяги двигателей, координаты нахождения аппарата, плотность воздуха вокруг аппарата.

1. **Моделирование полета. Программная реализация**
2. **Цель:**

Согласно цели миссии Спутник-5 нам необходимо выйти на орбиту Земли, именно этап взлета мы решили смоделировать, используя ранее составленную физико-математическую модель. Моделирование представляет из себя программу, результатом которой будут графики, показывающие достаточное количество информации для написания выводов о правильности той или иной части физико-математической модели. Помимо графиков, которые будут построены формулами, также понадобятся графики тех же величин, но полученные из KSP, для дальнейшего сравнения. Главной задачей данной главы является проверка правильности физико-математической модели путем сравнения графиков, полученных из KSP и из выведенных формул, и извлечением из этого сравнения выводов.

1. **Моделирование:**
   1. **Структура кода:**

Для программной реализации был написан скрипт matmodel.py включающий в себя несколько этапов:

* + - Скачивание нужных библиотек и считывание данных из JSON файла data.json, чтобы получить нужные нам величины из KSP.
    - Инициализация констант и переменных, нужных для вычисления величин и отвечающих за различные параметры ракеты.
    - Реализация функций зависимости массы от времени, плотности атмосферы от высоты и ускорения свободного падения от высоты.
    - Реализация главного цикла while, с ограничением времени и со всеми нужными расчетами.
    - Подготовка данных из KSP для дальнейшей визуализации.
    - Построение графиков.
  1. **Получение данных**

Наша команда использует язык программирования Python и библиотеку matplotlib для построения графиков, потому что это один из самых мощных инструментов визуализации, а также он прост в изучении с нуля.

Данные из KSP получаются с помощью библиотеки kerbal Remote Procedure Call (kRPC), он является модом для KSP. kRPC состоит из двух частей: серверного клиента, который устанавливается в файлы игры, и библиотеки для языка программирования. Во время полета запускается сервер, к которому подключается программа, запущенная в терминале, с помощью протоколов protobuf и ASIO. Автопилот обращается к серверу с некоторым интервалом (для некоторых графиков это 2 секунды, для некоторых 5 секунд) и считывает данные о полете в конкретный момент времени. А именно: координаты (x, y, z) относительно неподвижной земли, полная скорость ракеты, высота, сила тяги, масса ракеты, угол наклона ракеты. Все это записывается в JSON файл для дальнейшей обработки.

Данные, полученные на основе физико-математической модели представляют из себя списки (одна величина – один список) значений на каждой секунде (интервал измерения – 1 секунда). С помощью выведенных формул мы находим: скорость по х, скорость по у, полная скорость, массу ракеты, силу тяги, плотность атмосферы, координаты х и у положения ракеты, высоту полета.

Угол наклоны ракеты относительно горизонта получается с помощью специальной формулы, которая взята из KSP, где turn\_start\_altitude – начальная высота поворота, turn\_end\_altitude = 150\_000 – конечная высота поворота, target\_altitude – ожидаемая конечная высота

**Изображение выглядит как текст, Шрифт, снимок экрана, число

Автоматически созданное описание**

Изображение выглядит как текст, снимок экрана, Шрифт

Автоматически созданное описание

* 1. **Вычисления**

Главный цикл while начинается с вычисления текущего угла наклонения ракеты, далее происходит расчет текущей силы тяги двигателей в зависимости от времени. После этого рассчитываются скорости ракеты по оси х и по оси y, далее вычисляется текущая масса и высота. В конце находим полную скорость движения ракеты и добавляем в списки полученные величины в этот момент времени.

Для правильного отображения графиков значений из KSP после цикла составляются списки, парсится файл JSON.

* 1. **Построение графиков**

На основе полученных данных, с помощью функций библиотеки matplotlib построим 7 графиков, для 7-ми разных величин. На каждом из графиков будет изображаться две функции зависимости величин, одна из нашей физико-математической модели, вторая – из KSP. Мы будем рассматривать графики от времени:

* Полной скорости
* Высота
* Угла наклона
* Массы ракеты
* Силы тяги
* Плотности атмосферы
* Траектория полета

1. **Анализ графиков**
   1. **Полная скорость**

**Изображение выглядит как текст, линия, График, диаграмма

Автоматически созданное описание**

**Описание:**

* График KSP быстрее наращивает скорость после ~75 секунд.
* График физмат модели отстает, особенно ближе к 200 секунде полета.

**Причины расхождений:**

**1. Гравитационные потери:**

* В физмат модели, вероятно, угол наклона ракеты уменьшается медленнее, что приводит к большему времени преодоления гравитации. Это увеличивает потери скорости из-за необходимости компенсировать силу тяжести.
* В KSP это осуществляется более оптимально: угол наклона уменьшается быстрее, и скорость набирается эффективнее**.**

**2. Атмосферное сопротивление:**

* В KSP сопротивление атмосферы моделируется с учетом реальных эффектов, что влияет на скорость набора высоты и горизонтального ускорения.
* В физмат модели мы пренебрегаем многими факторами, например сила действия ветра, вращение планеты и другое.
  1. **Высота**

**Изображение выглядит как текст, линия, График, диаграмма

Автоматически созданное описание**

**Описание:**

Графики высоты ракеты показывают, что KSP достигает большей высоты за одинаковое время. Разница начинается после 75 секунд.

**Причины расхождений:**

**1. Эффективность гравитационного поворота:**

* В KSP более оптимальная траектория полета уменьшает вертикальные гравитационные потери и позволяет быстрее набирать горизонтальную скорость.
* В физмат модели ракета может “задерживаться” на наборе высоты из-за медленного изменения угла наклона.

**2. Учет аэродинамики:**

* Атмосферное сопротивление в KSP сильнее влияет на высоту, особенно на первых 75 секундах, когда плотность атмосферы KSP изменяется чуть медленнее.
  1. **Угол наклона**

**Изображение выглядит как текст, линия, График, диаграмма

Автоматически созданное описание**

**Описание:**

* + Углы наклона в KSP уменьшаются более плавно, а в физмат модели — чуть медленнее.
  + К 200 секунде угол в KSP чуть меньше.

**Причины расхождений:**

KSP и физмат модель используют одну и ту же формулу для расчета угла наклона, однако она зависит от высоты, а графики высоты начинают немного отличаться после определенного момента времени, следовательно изменение угла тоже отличается от реального.

* 1. **Масса ракеты**Изображение выглядит как текст, линия, диаграмма, График

     Автоматически созданное описание

**Описание:**

Расход топлива до отсоединения первой ступени в KSP больше, чем в физмат модели. В промежутке времени примерно от 60 и до конца расход топлива одинаковый.

**Расхождение:**

Самое главное различие в графиках – изменение массы до 60 ой секунды, это обусловлено тем, что сила тяги на этом промежутке времени растет у KSP, в отличие от константной силы тяги в физмат модели.

* 1. **Сила тяги**Изображение выглядит как текст, линия, диаграмма, График

     Автоматически созданное описание

**Описание:**

Так как в KSP силы тяги ступеней практически константы, графики сильно совпадают большую часть времени.

* 1. **Плотность атмосферы**Изображение выглядит как текст, линия, График, диаграмма

     Автоматически созданное описание

**Описание:**

Плотность атмосферы в KSP уменьшается медленнее, чем плотность в физмат модели. Примерно в одно время становятся приблизительно равны нулю.

**Расхождения:**

Так как плотность зависит от высоты (барометрическая формула), то расхождения могут быть из за того, что высота в KSP в начале набирается чуть медленнее, чем в физмат модели, следовательно плотность изменяется по разному.

* 1. **Траектория полета**Изображение выглядит как диаграмма, снимок экрана, График, текст

     Автоматически созданное описание

**Описание:**

Графики траекторий полета до первой половины всего моделирования совпадают, потом график KSP набирает высоту чуть быстрее.

**Расхождение:**

Стартовые точки: в физмат модели мы начинаем полет с позиции (0, R), где R – радиус Кербина. В KSP взлетная площадка находится на других координатах. Различие в наборе высоты объясняется графиком зависимости высоты от времению

1. **Выводы**

Основные причины расхождений:

* Оптимизация гравитационного поворота в KSP снижает гравитационные потери и улучшает эффективность набора скорости и высоты.
* Учет аэродинамических сил приводит к более реалистичным данным.
* Сила тяги в KSP не всегда постоянная, иногда для правильного набора высоты ее нужно изменять.

Для получения большего сходства необходимо усложнить физико математическую модель, учитывать больше факторов, таких как неравномерный расход топлива, изменение силы тяги для правильного гравитационного поворота, сила действия ветра.

1. Заключение

В ходе работы над данным проектом нами была проведена всесторонняя исследовательская и практическая работа, включающая исторический, физико-математический и программно-симуляционный анализ. Изначально был составлен план проекта, определены задачи и цели, а также распределены роли в команде: Широбоков Дмитрий Андреевич (101БВ) выступил тимлидом и программистом (KSP), Волоснев Фёдор Антонович (101БВ) занимался физикой, математическими расчетами и мат. моделью, Рахимов Михаил Юрьевич (101БВ) занимался программированием и дизайном продукта, а Клещев Даниил Олегович (101БВ) помогал с дизайном и собирал всю историческую информацию.

На первом этапе была собрана вся необходимая историческая информация о ракете и её характеристиках. Эти данные стали основой для составления физико-математической модели полёта, где учитывались такие параметры, как тяга двигателей, масса ракеты, сопротивление, площадь поперечного сечения, коэффициент сопротивления формы. Далее была проведена реализация модели в KSP (Kerbal Space Program), где нами была поэтапно собрана ракета, максимально приближённая к оригинальной конструкции. При написании автопилота использовались теоретические расчёты, которые включали уравнения движения, уравнение Циолковского, моделирование гравитационного поворота и определение изменения скорости на различных этапах полёта. Был разработан и прописан автопилот с использованием библиотеки kRPC и программного кода на Python, что позволило автоматизировать запуск, гравитационный поворот, достижение апогея и расчёт манёвров.

Следующим этапом стала реализация математической модели полёта на Python, основанной на ранее составленных физико-математических уравнениях. Программа моделирует траекторию ракеты, учитывает изменение скорости и массы ракеты, вычисляет высоту, сила тяги задается константами, рассчитывает угол наклона относительно горизонта, а также из барометрической формулы рассчитывает плотность высоты в зависимости от высоты.

В результате проекта нам удалось смоделировать миссию «Спутник 5» и успешно продемонстрировать вывод ракеты на орбиту. Мы провели глубокий анализ данных, включая графики скорости, высоты, массы, силы тяги, угла наклона и плотности атмосферы, что позволило объяснить возникающие расхождения и влияние таких факторов, как гравитационные потери и аэродинамическое сопротивление. В ходе работы мы научились грамотно распределять задачи, эффективно работать в команде, ставить сроки и достигать поставленных целей. Проект показал, как можно объединить знания из физики, математики и программирования для успешного моделирования космических миссий и углубил наше понимание современных методов расчёта и симуляции.

1. Список использованных источников
2. kRPC. Документация. URL: https://krpc.github.io/krpc/ (дата обращения: 18.12.2024).
3. Tsiolkovsky rocket equation. Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Tsiolkovsky\_rocket\_equation (дата обращения: 18.12.2024).
4. Effective exhaust velocity. Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Effective\_exhaust\_velocity (дата обращения: 18.12.2024).
5. Sutton G.P., Biblarz O. Rocket Propulsion Elements. 7th ed. New York: Wiley-Interscience, 2001. P. 68. URL: https://books.google.com/books?id=KEPgEgX2BEEC&pg=PA68 (дата обращения: 18.12.2024).
6. Vis-viva equation. Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Vis-viva\_equation (дата обращения: 18.12.2024).
7. Bate R.R., Mueller D.D., White J.E. Fundamentals of Astrodynamics. New York: Dover Publications, 1971. P. 30. URL: https://books.google.ru/books?id=C70gQI5ayEAC&pg=PA30 (дата обращения: 18.12.2024).
8. Спутник-5. Википедия. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Спутник-5 (дата обращения: 18.12.2024).
9. Sputnik 5 - Spacecraft - the NSSDCA. NASA. URL: https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=1960-011A (дата обращения: 18.12.2024).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

**Код:**

**Скрипт создания графиков (matmodel.py):**

import math  
import numpy as np  
import matplotlib.pyplot as plt  
import json  
  
#получения данных из KSP  
data = {}  
with open("data (7).json", "r") as f:  
 data = json.load(f)  
  
  
# Константы и параметры  
G = 6.67430e-11  
M\_kerbin = 5.292e22 # Масса Кербина (кг)  
R\_kerbin = 600e3 # Радиус Кербина (м)  
rho0 = 1.114 # Плотность воздуха на уровне моря (кг/м³)  
H = 5600 # Характерная высота атмосферы (м)  
d = 0.5 # Коэффициент сопротивления формы  
A = 69.4 # Площадь поперечного сечения ракеты (м²)  
  
t1 = 60 # Момент времени отсоединения первой ступени  
t2 = 173 # Момент времени отсоединения второй ступени  
t3 = 300 # Момент времени отсоединения второй ступени  
  
# Исходные параметры ракеты  
m0 = 287e3 # Общая масса ракеты (с полезной нагрузкой и топливом)  
m1 = 65280 # Сухая масса первой ступени  
m2 = 40000  
m3 = 30000 # Сухая масса второй ступени  
F\_t1 = 5390e3 # Сила тяги первой ступени (Н) (4 двигателя в сумме)  
F\_t2 = 1460e3 # Сила тяги второй ступени (Н) (1 центральный двигатель)  
F\_t3 = 215000 # Сила тяги третье ступени (Н) (1 двигатель)  
delta1 = 900 # Расход топлива первой ступени (кг/с)  
delta2 = 500 # Расход топлива второй ступени (кг/с)  
delta3 = 60 # Расход топлива третье ступени (кг/с)  
  
# Начальные условия  
v\_x = 0 # Горизонтальная скорость (м/с)  
v\_y = 0 # Вертикальная скорость (м/с)  
h = 0 # Высота (м)  
current\_mass = m0  
V\_fin = 0  
t = 0  
x = 0  
y = R\_kerbin  
  
dt = 1 # Шаг времени (с)  
  
time = [] # Массив времеи  
speed\_values = [] # Массив полной скорости  
height\_values = [] # Массив высоты  
angel\_values = [] # Массив полной скорости  
mass\_values = [] # Массив высоты  
rho\_values = [] # Массив полной скорости  
power\_values = [] # Массив высоты  
vx\_values = [] # Массив полной скорости  
vy\_values = [] # Массив высоты  
x\_values = [] # Массив значений по х  
y\_values = [] # Массив значений по y  
  
turn\_start\_altitude = 250  
turn\_end\_altitude = 150\_000 # 150  
target\_altitude = 300\_000  
turn\_angle = 0  
target\_time = 200  
  
  
def M(t):  
 if t <= t1:  
 return m0 - delta1 \* t - delta2 \* t  
 elif t > t1 and t <= t2:  
 return m0 - delta1 \* t1 - delta2 \* t1 - m1 - delta2 \* (t - t1)  
 else:  
 return m0 - delta1 \* t1 - delta2 \* t1 - m1 - delta2 \* (t2 - t1) - m2 - delta3 \* (t - t2)  
  
  
def g(h):  
 return G \* M\_kerbin / (R\_kerbin + h) \*\* 2  
  
  
def rho(h):  
 return rho0 \* (1 / (math.e \*\* (h / H)))  
  
  
# Расчеты  
while t < target\_time : # Общее время полета  
  
 if turn\_start\_altitude <= h <= turn\_end\_altitude:  
 frac = ((h - turn\_start\_altitude) /  
 (turn\_end\_altitude - turn\_start\_altitude))  
 new\_turn\_angle = frac \* 90  
 turn\_angle = new\_turn\_angle  
  
 # Определение текущей тяги и расхода топлива  
 if t <= t1: # Первая ступень  
 F\_t = F\_t1  
 elif t1 < t <= t2: # Вторая ступень  
 F\_t = F\_t2  
 else:  
 F\_t = F\_t3  
  
 if h == 300000:  
 break  
  
 cur\_rho = rho(h)  
 # Обновление скоростей по осям  
 if V\_fin < math.sqrt((G \* M\_kerbin) / (R\_kerbin + target\_altitude)):  
 v\_y += dt \* ((F\_t \* math.sin(math.radians(90 - turn\_angle)) - (current\_mass \* g(t)) - (0.5 \* cur\_rho \* (V\_fin \*\* 2) \* math.sin(math.radians(90 - turn\_angle)) \* d \* A)) / current\_mass)  
 v\_x += dt \* ((F\_t \* math.cos(math.radians(90 - turn\_angle)) - (0.5 \* cur\_rho \* (V\_fin \*\* 2) \* math.cos(math.radians(90 - turn\_angle)) \* d \* A)) / current\_mass)  
  
 current\_mass = M(t)  
 x += v\_x \* dt  
 y += v\_y \* dt  
 h = math.sqrt(x \*\* 2 + y \*\* 2) - R\_kerbin  
 # Обновление полной скорости и высоты  
 V\_fin = math.sqrt(v\_x \*\* 2 + v\_y \*\* 2)  
  
 # Запись данных для графиков  
 time.append(t)  
 speed\_values.append(V\_fin)  
 height\_values.append(h)  
 angel\_values.append(90 - turn\_angle)  
 mass\_values.append(current\_mass)  
 rho\_values.append(cur\_rho)  
 power\_values.append(F\_t)  
 vx\_values.append(v\_x)  
 vy\_values.append(v\_y)  
 x\_values.append(x)  
 y\_values.append(y)  
 t += dt  
  
  
# Построение графиков  
fig = plt.figure(figsize=(20, 20))  
  
#Получение данных из KSP  
time2 = [i for i in data["time"] if i < target\_time ]  
mass = np.array([data["mass"][i] for i in range(len(time2))])  
speed\_surface = np.array([data["velocity\_surface"][i] for i in range(len(time2))])  
speed\_orbit = np.array([data["velocity\_orbit"][i] for i in range(len(time2))])  
angle = np.array([data["angle"][i] for i in range(len(time2))])  
height = np.array([data["altitude"][i] for i in range(len(time2))])  
thrust = [data["thrust"][i] for i in range(len(time2))]  
rho = [data["atmosphere\_density"][i] for i in range(len(time2))]  
pos\_x = np.array([data["position"][i][0] for i in range(len(time2))])  
pos\_y = np.array([-data["position"][i][2] for i in range(len(time2))])  
pos\_z = np.array([-data["position"][i][1] for i in range(len(time2))])  
  
# График полной скорости  
plt.subplot(2, 3, 1)  
plt.plot(time, speed\_values,'red', label="Физ.модель")  
plt.plot(time2, speed\_surface,'blue', label="KSP")  
plt.legend()  
plt.title("График полной скорости ракеты")  
plt.ylabel("Скорость (м/с)")  
plt.grid()  
#  
# #График высоты  
plt.subplot(2, 3, 2)  
plt.plot(time, height\_values, 'red', label="Физ.модель")  
plt.plot(time2, height, 'blue', label="KSP")  
plt.legend()  
plt.title("График высоты ракеты")  
plt.ylabel("Высота (м)")  
plt.grid()  
# #  
# # График угла наклона  
plt.subplot(2, 3, 3)  
plt.plot(time, angel\_values, 'red', label="Физ.модель")  
plt.plot(time2, angle, 'blue', label="KSP")  
plt.legend()  
plt.title("График угла наклона ракеты")  
plt.ylabel("Угол (градусы)")  
plt.grid()  
#  
# График массы  
plt.subplot(2, 3, 4)  
plt.plot(time, mass\_values, 'red', label="Физ.модель")  
plt.plot(time2, mass, 'blue', label="KSP")  
plt.legend()  
plt.title("График массы ракеты")  
plt.xlabel("Время (с)")  
plt.ylabel("масса (кг)")  
plt.grid()  
#  
#  
#График силы тяги  
plt.subplot(2, 3, 5)  
plt.plot(time, power\_values, 'red', label="Физ.модель")  
plt.plot(time2, thrust, 'blue', label="KSP")  
plt.legend()  
plt.title("График силы тяги ракеты")  
plt.xlabel("Время (с)")  
plt.ylabel("Сила (Н)")  
plt.grid()  
  
#График плотности  
plt.subplot(2, 3, 6)  
plt.plot(time, rho\_values, 'red', label="Физ.модель",)  
plt.plot(time2, rho, "blue", label="KSP")  
plt.legend()  
plt.title("График плотности атмосферы")  
plt.xlabel("Время (с)")  
plt.ylabel("Плотность (кг/м3)")  
plt.grid()  
  
  
# График y от x  
figure1 = plt.figure(figsize=(5, 5))  
ax = figure1.add\_subplot()  
draw\_circle = plt.Circle((0, 0), R\_kerbin,)  
ax.add\_artist(draw\_circle)  
ax.set(xlim=(-R\_kerbin, R\_kerbin), ylim=(0, 2 \* R\_kerbin))  
plt.plot(x\_values, y\_values, "red", label="Физ.модель")  
plt.plot(pos\_x, pos\_y, "blue", label="KSP")  
  
plt.show()

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

**Медиа**: