

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования
МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)
(МАИ)
InBARКТ

УДК 523.42
Рег. № НИОКТР
Рег. № ИКРБС

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

ВЕНЕРА-7

Руководитель НИР,
ассистент кафедры 806,
инженер НИО-806,
инженер 2 категории НИО-806

_____ Кондаратцев В.Л.

Руководитель НИР,
доцент кафедры 801

_____ Тимохин М.Ю.

Москва 2023

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель НИР,
ассистент кафедры 806,
инженер НИО-806,
инженер 2 категории НИО-806

_____ Кондаратцев В.Л.
подпись, дата

Руководитель НИР,
доцент кафедры 801

_____ Тимохин М.Ю.
подпись, дата

Исполнители:

Лидер проекта,
программист Python

_____ Соловьева Н.С.
подпись, дата (раздел 2, 4)

Программист KSP

_____ Нургалиев Д.И.
подпись, дата (раздел 3)

Физик,
главный математик

_____ Радион Н.А.
подпись, дата (раздел 1)

Математик,
составитель отчета

_____ Федорова Е.В.
подпись, дата (введение, раздел 1,
заключение)

РЕФЕРАТ

Отчет 30 с., 1 кн., 18 рис., 0 табл., 32 источн., 1 прил.

СИМУЛЯЦИЯ ПОЛЕТА НА ВЕНЕРУ, АВТОМАТИЧЕСКАЯ МЕЖПЛАНЕТНАЯ СТАНЦИЯ, МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ, ФИЗИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ, ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКОВ, МЕЖОРБИТАЛЬНЫЕ ПОЛЕТЫ

Объектом исследования является автоматическая межпланетная станция «Венера-7», а также космический корабль «Молния-М», предназначенный для ее доставки на Венеру.

Цель работы – разработка математической и физической модели и проведение симуляции исторической миссии «Венера - 7».

В процессе работы проводилось детальное изучение информации о конструкции корабля и автоматической межпланетной станции.

В результате исследования были составлены физические и математические модели, на основе реальных данных был построен прототип корабля в системе KSP и проведен пилотируемый полет к Венере.

Область применения научно-образовательная.

Основные конструктивные показатели: высокая схожесть с реальным космическим аппаратом.

СОДЕРЖАНИЕ

РЕФЕРАТ	3
ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ	5
ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЙ	6
ВВЕДЕНИЕ	7
ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ.....	8
1 Разработка математической модели.	8
1.1 Физическая модель.....	8
1.2 Математическая модель	11
2 Программная реализация	15
Оценка погрешности.....	16
3 Симуляция полета.....	18
4 Сравнение симуляции и моделирования	24
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	26
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	27
ПРИЛОЖЕНИЕ А	30

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящем отчете о научно-исследовательской работе применяют следующие термины с соответствующими определениями

Kerbal Space Program	Компьютерная игра, разработанная и изданная компанией Squad. Игра относится к жанру подлинных космических симуляторов.
Адиабатический процесс	Процесс, при котором нет передачи тепла между газом и окружающей средой. Изменение объема газа приводит к изменению его давления и температуры
Гидростатическое равновесие	Понятие, используемое в физике для описания равновесия гравитационных сил и направленных в противоположную сторону сил давления среды
Гомановский переход	Эллиптическая орбита, используемая для перехода между двумя другими орбитами, обычно находящимися в одной плоскости.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЙ

В настоящем отчете о научно-исследовательской работе применяют следующие сокращения с соответствующими определениями:

KSP – Kerbal Space Program

СА – Спускаемый аппарат

АМС – Автоматическая межпланетная станция

САС – Система атмосферного сброса

ВВЕДЕНИЕ

Венера – одна из таинственных планет Солнечной системы^[1]. Находясь второй по счету от Солнца, именно она, а не Меркурий, является самой горячей.

В настоящий момент продолжается изучение Венеры: Роскосмос заявил^[2], что одна из задач на 2021-2025 гг. предполагает участие не менее чем в 2 миссиях в рамках международной кооперации по исследованию планет Солнечной системы, в том числе Венеры. Планируется отправка станции «Венера-Д»^[3] со спутником планеты и зондом, который должен проработать на поверхности планеты не менее месяца, а также комплекс «Венера-Глоб»^[4] из орбитального спутника и нескольких спускаемых модулей. Иные страны также вовлечены в изучение планеты:^{[5][6][7]}

- Индийская ISRO планирует миссию «Шукраян-1».
- Американское НАСА проектирует венероход AREE, проекты DAVINCI+ и VERITAS. Частная космическая компания Rocket Lab планирует в 2025 году запустить свой зонд.
- Европейское ЕКА — аппарат EnVision.

На данный момент имеются данные о температуре, плотности, давлении, химическом составе атмосферы, грунте и многом другом^[8]. В наличии даже черно-белые и цветные фотографии поверхности планеты и запись звука. Но это было известно не всегда. До 1970 года человечество еще не ведало той полнотой знаний, которая имеется сейчас, и активно изучало космос в период «Космической гонки».

Главная цель миссии «Венера-7», запущенной Советским Союзом в 1970 году, заключалась в исследовании атмосферы^[9]. Венера-7 стала первым аппаратом, осуществившим мягкую посадку на планету и отправившим домой ценные научные данные^{[10][11][12]}. Эти данные стали ключевым шагом в понимании и изучении атмосферных условий Венеры: оказалось, что давление у поверхности Венеры составляет 90 ± 15 атмосфер, а температура — $475^\circ \pm 20^\circ\text{C}$ ^[13].

Наша команда избрала именно эту миссию из-за ее комплексности, уникальности и большой исторической значимости^{[14][15][16][17]}. В данной исследовательской работе будет представлена симуляция полета АМС «Венера-7». Используя имеющиеся на текущий момент данные^{[18][19][20]} и научные сведения, наша команда углубится в изучение полета для составления физической и математической моделей.

В итоге наше исследование позволит пролить свет на миссию «Венера-7». Мы надеемся, что результаты данной работы будут интересны и полезны для студенческого сообщества и поспособствуют дальнейшим исследованиям этой загадочной и таинственной планеты.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

1 Разработка математической модели.

Радион Никита Алексеевич, физик и математик команды InBAPKT, при поддержке Федоровой Екатерины Васильевны, математика и составителя отчета команды InBAPKT, разработал физическую и математическую модель.

Будем считать ракету за материальную точку.

Стартовая масса: 1180 кг

Масса полезного груза: 500 кг

Количество ускорений на каждой ступени: 1-я ступень – 5; 2-я ступень – 4; 3-я ступень – 4

1.1 Физическая модель

$G = 6,67 * 10^{-11} \frac{\text{м}^3}{\text{кг} * \text{с}^2}$ — универсальная гравитационная постоянная

$R = 6051,8 \text{ км}$ — радиус Венеры

$V = 1,8 \text{ м/с}$ — скорость вращения Венеры

$M = 4,87 * 10^{24} \text{ кг}$ — масса Венеры

$\rho = 67 \text{ кг/м}^3$ — плотность атмосферы Венеры

$P = 90 \text{ бар}$ — давление атмосферы на поверхность Венеры

$T = 477^\circ\text{C}$ — температура на поверхности Венеры

$S_n = 460234317 \text{ км}^2$ — площадь парашюта

$g = 8,87 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения

Этап 1: взлет ракеты-носителя «Молния-М»

Согласно II закону Ньютона $\vec{F} = m\vec{a}$. Следовательно, определим все F , действующие на ракету при взлёте, и выразим их через этот закон (рисунок 1).

$F_{\text{тяги}} = P/v$, где P – полезная мощность, а v – скорость ракеты^[21].

$F_{\text{прит.}} = G \frac{m_1 * m_2}{R^2}$, где G – универсальная гравитационная постоянная, m_1 – масса ракеты, m_2 – масса Земли.

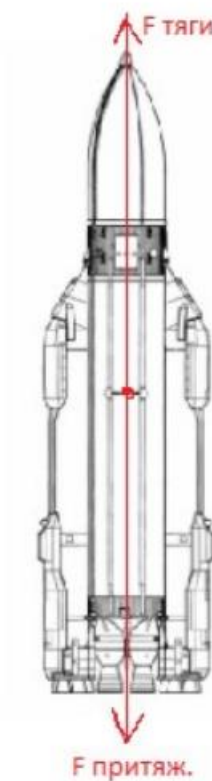


Рисунок 1

Этап 2: выход на орбиту Земли и Гомановский переход

На данном этапе, чтобы перейти с орбиты Земли в свободное космическое пространство (Гомановский переход) «Венера-7» необходимо набрать II Космическую Скорость^[22]. Следовательно, рассчитать орбитальную v :

$$v_{\text{орб.}} = \sqrt{\mu * \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)}, \text{ где } \mu - \text{гравитационный параметр, } r - \text{расстояние между}$$

телами, a – большая полуось.

В случае гиперболической траектории в уравнении для скорости слагаемое имеет вид $+\frac{1}{a}$; если принять значения a отрицательные, знак минус сохранится.

Поскольку АМС движется по эллиптической орбите^[23], то формула меняется на:

$$v_{\text{орб.}} = \sqrt{\frac{\mu}{r}}$$

Также необходимо определить угол начальной конфигурации:

$V = 180^\circ - \alpha$, где α – дуга, которую проходит ракета за время полёта.

$\alpha = w * t$, где w – угловая скорость.

$w = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$, где $\Delta\varphi$ – угол поворота радиуса вектора.

Также нужно рассчитать расход топлива по формуле Циолковского^[24]:

$\Delta t = \left(1 - e - \frac{\Delta v_s}{t}\right)$, где 1 – идеальная тяга ракеты, $e = 0,7$, Δv_s – изменение скорости, S – расстояние, которым мы пренебрегаем, так как считаем ракету за материальную точку.

Рассчитаем приращение v :

$$\Delta v_A = \sqrt{\frac{\mu}{r_1}} * \left(\sqrt{\frac{2r_1}{r_1+r_2}} - 1 \right)$$

$$\Delta v_B = \sqrt{\frac{\mu}{r_{12}}} * \left(-\sqrt{\frac{2r_1}{r_1+r_2}} - 1 \right)$$

Тогда суммарное изменение v : $\Delta v_S = \Delta v_A + \Delta v_B$.

Орбитальный переход.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{\mu}}, \text{ где } a = \text{длина большой полуоси, } \mu - \text{гравитационный параметр.}$$

Угол наклона траектории: $h = rv \cos \varphi$, где h – угловой момент для данной орбиты, v – орбитальная скорость тела, r – расстояние от обращаемого тела до центрального, φ – угол наклона траектории.

Угол ψ является углом между местной горизонталью и большой полуосью эллипса. v – местная истинная аномалия. $\varphi = v + \frac{\pi}{2} - \psi$, следовательно,

$$\cos \varphi = \sin(\psi - v) = \sin \psi \cos v - \sin v \cos \psi = \frac{1+e \cos v}{\sqrt{1+e^2+2e \cos v}}, \text{ где } e - \text{экспонента,}$$

Этап 3: посадка на Венеру

Для понимания заключительного этапа посадки будет пользоваться рисунком 2.

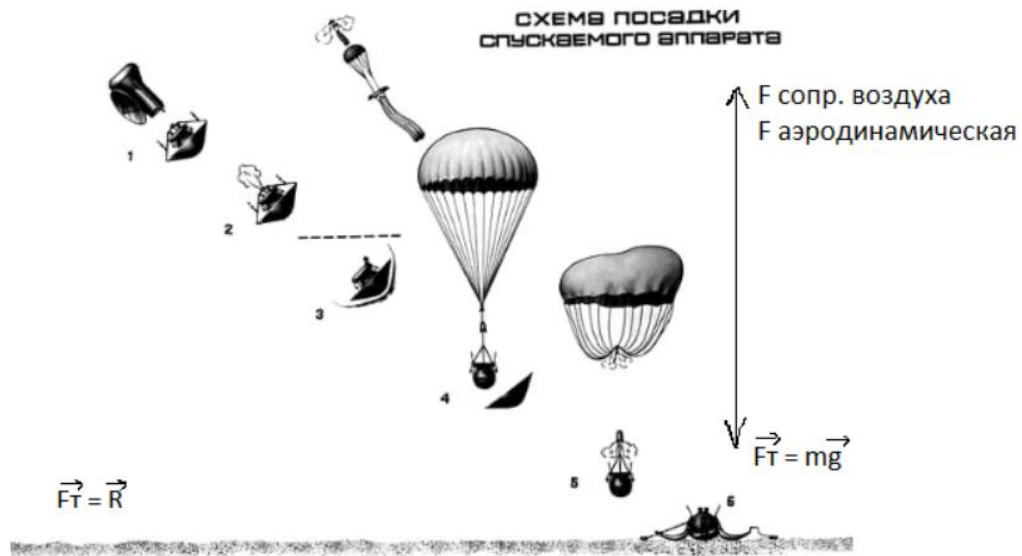


Рисунок 2

Прежде всего необходимо понимать, что посадка на поверхность Венеры осуществлялась при помощи парашюта, как тормозного средства, а не тормозной системы, как у ракет. Следовательно, посадка будет совершена за счёт:

$F_{\text{сопр.возд.}} = \rho * l x * S \frac{v^2}{2}$, где ρ – плотность воздуха, $l x = 0,7$ – аэродинамический коэффициент, S – площадь парашюта, $v = \frac{S}{t} = \frac{55000\text{м}}{1980\text{с}} = 26,6$ м/с – скорость парашюта.

$$F_{\text{подъемная}} = \rho * l y * S \frac{v^2}{2}$$

Сложив эти две силы, мы получим полную аэродинамическую силу, обозначим её как $\vec{R} = \vec{F}_{\text{сопр.возд.}} + \vec{F}_{\text{подъемная}}$

Тогда нам необходимо рассчитать t , за которое спускаемый аппарат достигнет поверхности. Так как тормозной парашют заработает на высоте 55 м над поверхностью, а v снизиться с $x = 26,6$ м/с, то нам потребуется 33 минуты.

1.2 Математическая модель

Учитывая специфику нашей миссии и ознакомившись со всеми процессами во время полёта ракеты, можем составить математическую модель и сделать выводы о зависимостях:

$$\begin{cases} \rho(h) = \rho_0 * e^{-h/H} \\ P(h) = P_0 * e^{-h/H} \\ H = (h_2 - h_1) / \ln(P_1/P_2) \end{cases}$$

Зависимость давления от высоты:

Для нахождения зависимости давления от высоты на Венере можно использовать модель, основанную на идеальном газовом законе и статическом барометрическом уравнении.

Идеальный газовый закон утверждает, что давление P , объем V и температура T связаны следующим образом: $P = \frac{n * R * T}{V}$, где n – количество вещества, R – универсальная газовая постоянная^[25].

Статическое барометрическое уравнение связывает давление и высоту в вертикальном столбе газа: $dP/dh = -\rho * g$, где dP/dh – производная давления по высоте, ρ – плотность газа, g – ускорение свободного падения.

На Венере плотность газа будет меняться с высотой в связи с её атмосферой, и поэтому мы не можем использовать простую формулу для плотности. Однако мы можем воспользоваться моделью экспоненциального убывания плотности с высотой: $\rho(h) = \rho_0 * e^{-h/H}$, где ρ_0 – плотность на уровне моря, H – масштабная высота, которая определяет, как быстро плотность меняется с высотой^[26].

Теперь соединим все эти уравнения, чтобы получить зависимость давления от высоты на Венере:

$$\begin{aligned} dP/dh &= -\rho * g \\ dP/dh &= -\rho_0 * e^{-h/H} * g \\ dP &= -\rho_0 * e^{-h/H} * g * dh \\ \int dP &= \int -\rho_0 * e^{-h/H} * g * dh \end{aligned}$$

$$P(h) = -\rho_0 * H * g * e^{-h/H} + C, \text{ где } C - \text{постоянная интегрирования.}$$

В качестве начального условия можем выбрать давление на поверхности планеты, то есть $P(h = 0) = P_0$.

Таким образом, окончательная математическая модель для нахождения зависимости давления от высоты на Венере будет иметь вид:

$$P(h) = P_0 - \rho_0 * H * g * e^{-h/H}$$

Чтобы найти значение H , нам понадобится дополнительная информация, например, давление на определенной высоте или другие параметры атмосферы Венеры.

Если у нас есть известные значения давления P_1 и P_2 на двух разных высотах h_1 и h_2 соответственно, мы можем использовать эту информацию, чтобы найти значение масштабной высоты H .

Используя формулу для $P(h)$, получим два уравнения:

$$P_1 = P_0 - \rho_0 * H * g * e^{-h_1/H}$$

$$P_2 = P_0 - \rho_0 * H * g * e^{-h_2/H}$$

Мы можем разделить эти два уравнения и избавиться от P_0 и g :

$$\frac{P_1}{P_2} = e^{h_1 - h_2/H}$$

Затем можно взять натуральный логарифм от обеих сторон этого уравнения:

$$\ln(P_1/P_2) = (h_2 - h_1)/H$$

Переставив формулу, найдем H :

$$H = (h_2 - h_1)/\ln(P_1/P_2)$$

Таким образом, если у нас есть известные значения давления на двух разных высотах, мы можем использовать эту формулу для определения масштабной высоты H атмосферы Венеры.

Таким образом, математическая модель для нахождения давления на Венере от высоты при падении можно представить с помощью уравнения идеального газа в следующей форме:

$$P = P_0 * e^{-h/ht}$$

где:

P - давление на высоте h

P_0 - давление на поверхности Венеры,

h - высота над поверхностью Венеры,

ht - характерная высота, связанная с изменением давления (зависит от состава атмосферы).

Это уравнение основано на предположении об экспоненциальном снижении давления в атмосфере при падении, что справедливо при условии постоянства температуры и состава атмосферы на протяжении довольно большого диапазона высот.

Предположим, что плотность на уровне моря Венеры составляет примерно 67 кг/м^3 . Это значение является приближением, так как реальная атмосфера Венеры имеет сложную структуру и плотность меняется с высотой.

Зависимость плотности воздуха от высоты:

Для моделирования зависимости плотности воздуха от высоты на Венере можно использовать формулу экспоненциального убывания плотности с высотой. Эта модель основывается на предположении, что атмосфера Венеры можно рассматривать как идеальный газ.

Формула для зависимости плотности воздуха от высоты h на Венере имеет вид:

$$\rho(h) = \rho_0 * e^{-h/H}$$

где:

$\rho(h)$ - плотность воздуха на высоте h ,

ρ_0 - плотность воздуха на уровне моря (начальная плотность),

H - масштабная высота атмосферы Венеры.

В этой формуле, экспоненциальное убывание с высотой характеризуется параметром H . Чем меньше значение H , тем быстрее плотность воздуха убывает с высотой.

2 Программная реализация

Соловьева Надежда Сергеевна, программист и лидер команды InBAPKT, разработал физическую и математическую модель.

С помощью формул, полученных в математической модели, реализуем программный код на языке *Python*.

Учитывая специфику нашей миссии, а соответственно и зависимостей, было принято решение о том, чтобы рассматривать их во время этапа падения на Венеру, а именно последние 55 км падения, а за период вычислений брать 1 км. Программа должна рассчитать значения характеристик, фигурирующих в выбранных для изучения зависимостях.

Во время реализации используем следующие библиотеки: *math* - для математических операций с логарифмами и экспонентой, *json* - для работы с JSON-файлами, *numpy* - для работы с огромными числами, *matplotlib* – для визуализации полученных данных в виде графиков. С помощью графиков (рисунок 3 и рисунок 4) можно понять, что происходит с аппаратом в тот или иной момент времени, и сделать вывод, где вычисления не соответствуют происходящему с аппаратом

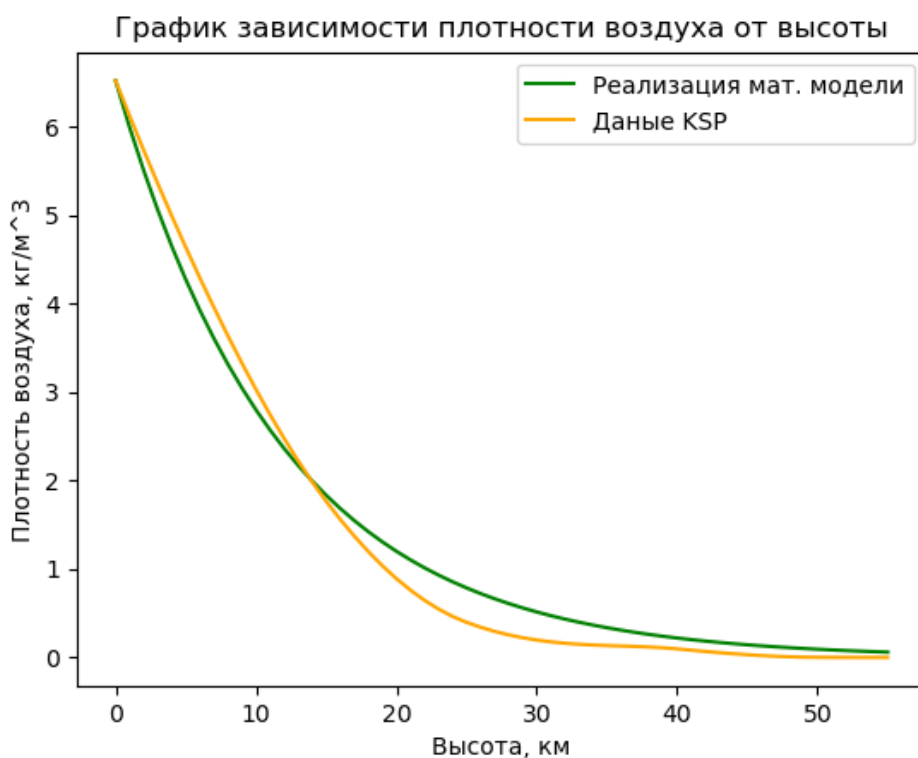


Рисунок 3

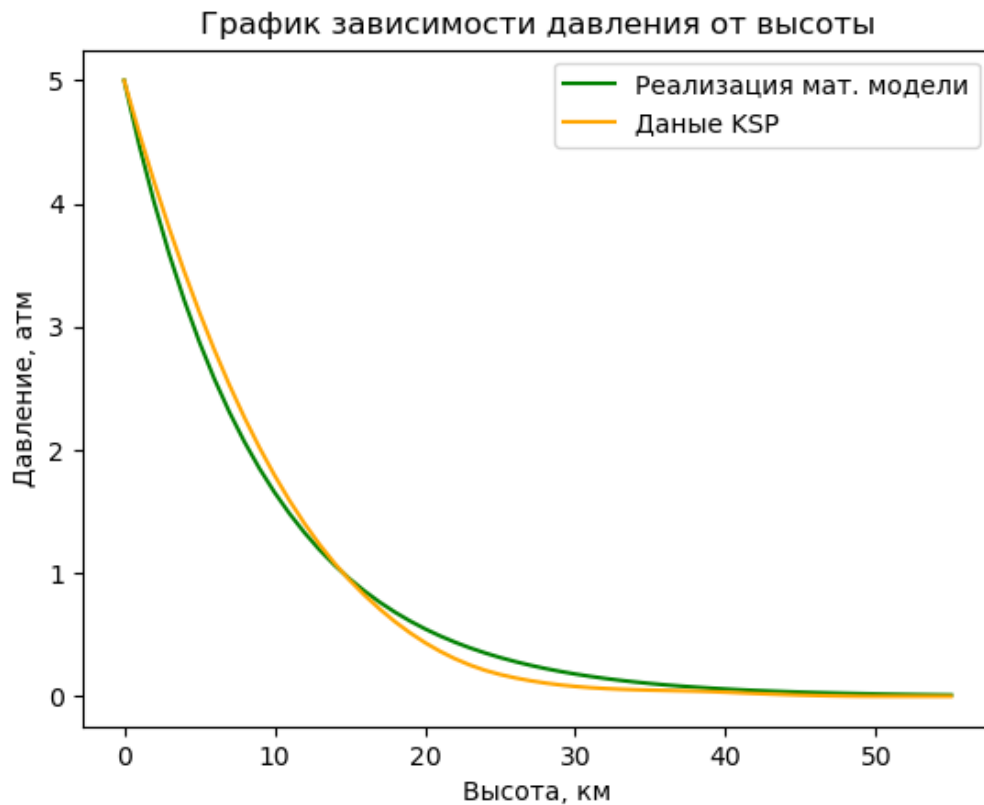


Рисунок 4

Оценка погрешности

Погрешность измерений была оценена с помощью анализа остатков, то есть разницы между фактическими и предсказанными значениями. Чем меньше разброс остатков, тем меньше погрешность измерений

Для этого была написана программа, вычисляющая эти остатки и строящая графики (рисунок 5 и рисунок 6) их зависимости от высоты.

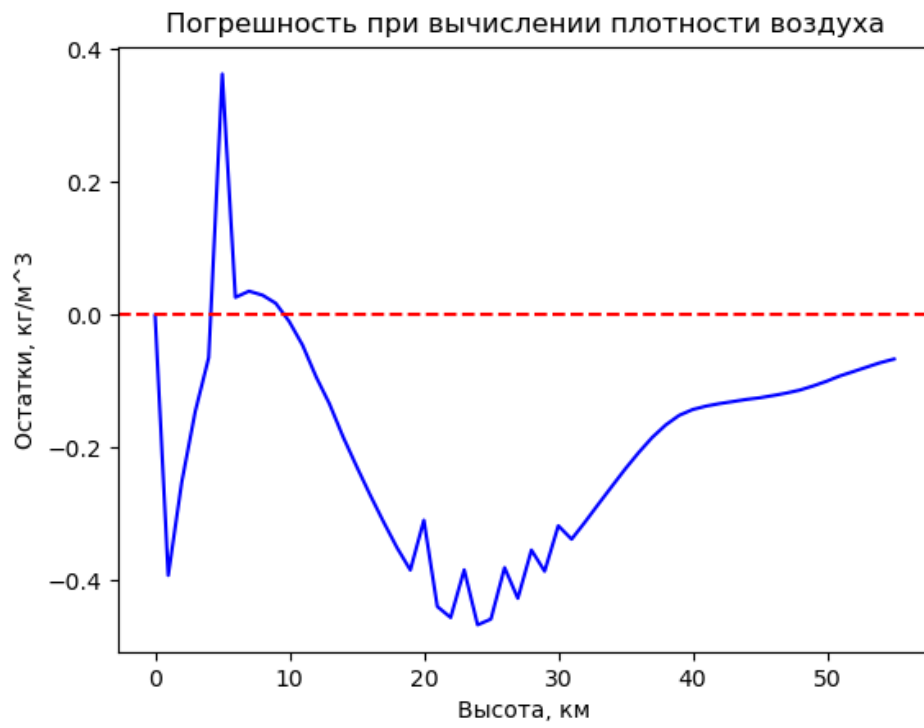


Рисунок 5

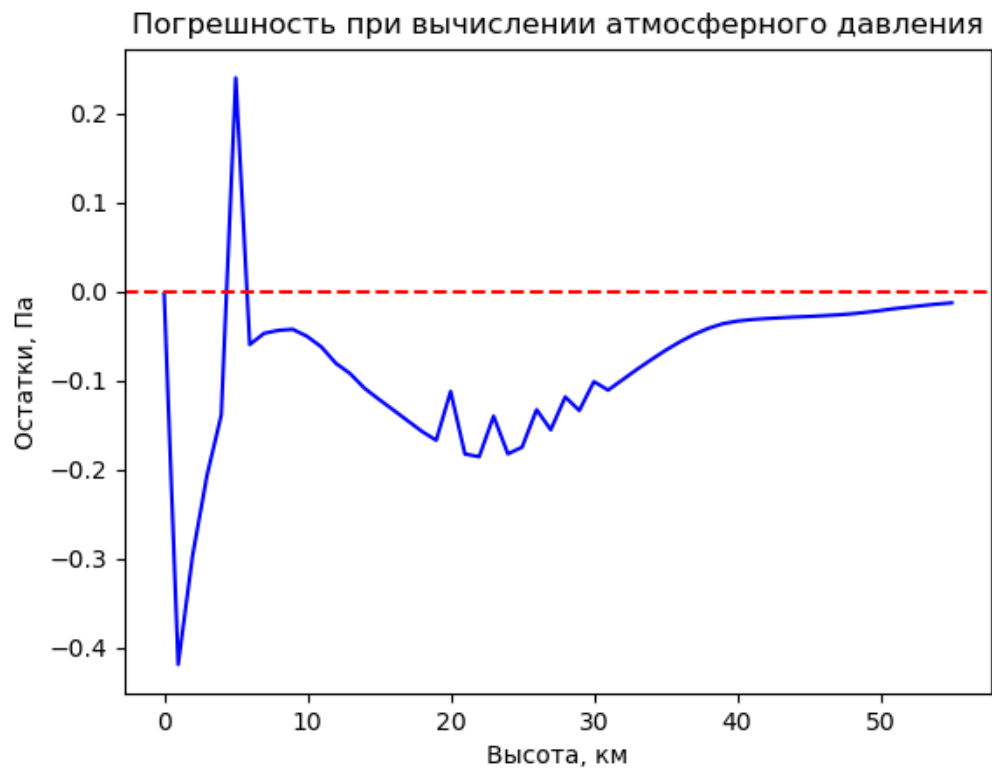


Рисунок 6

3 Симуляция полета

Нургалиев Даниэль Ильдарович, программист KSP^{[26][27][28][29][30]} команды InBARKT, симулировал полет «Венеры-7».

В рамках исследования был проведен эксперимент по детальной симуляции миссии «Венера-7» в KSP^[31]. Цель заключалась в тщательном воссоздании каждого этапа полета, придавая виртуальному пространству максимально реалистичные характеристики.

Процесс начался с подробного анализа конструкции^[18] ракеты-носителя «Молния-М». Не ограничиваясь общим взглядом, было уделено внимание каждой детали в стремлении достичь максимального соответствия оригинальному аппарату. Разделение на ступени, характеристики двигателей и топливных баков были воссозданы с учетом документированных данных.

Первый этап – старт с космодрома Байконур (рисунок 7) – требовал внимательного моделирования воздействия атмосферы и отделения ступеней. В процессе вывода аппарата в атмосферу следовало следить за расходом топлива, чтобы впоследствии не исчерпать его запас. На высоте 10,322 м ракета наклонилась под углом 45° , тем самым обеспечивая возникновение горизонтальной скорости, а на высоте 26,202 м, спустя 90 секунд после отделения первой ступени (рисунок 8), – под углом 90° для корректного выхода на орбиту. На высоте 70,379 м, спустя 185 секунд после отделения второй ступени (рисунок 9) ракета оказалась на орбите (рисунок 10).

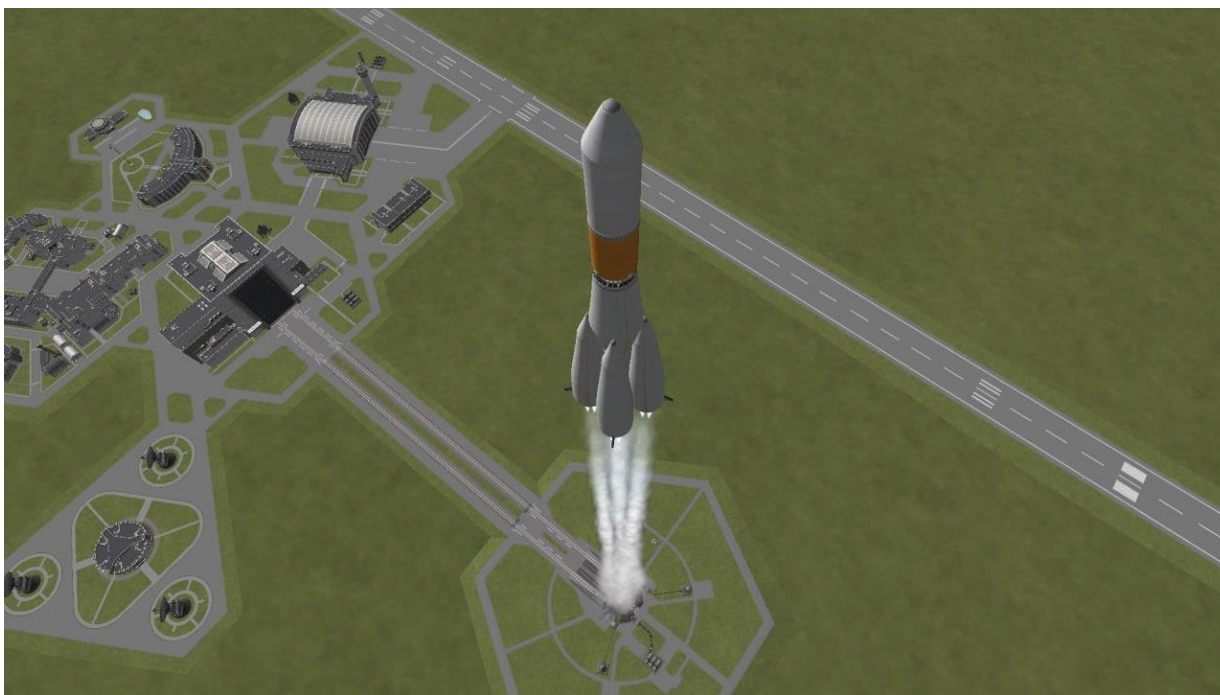


Рисунок 7



Рисунок 8



Рисунок 9

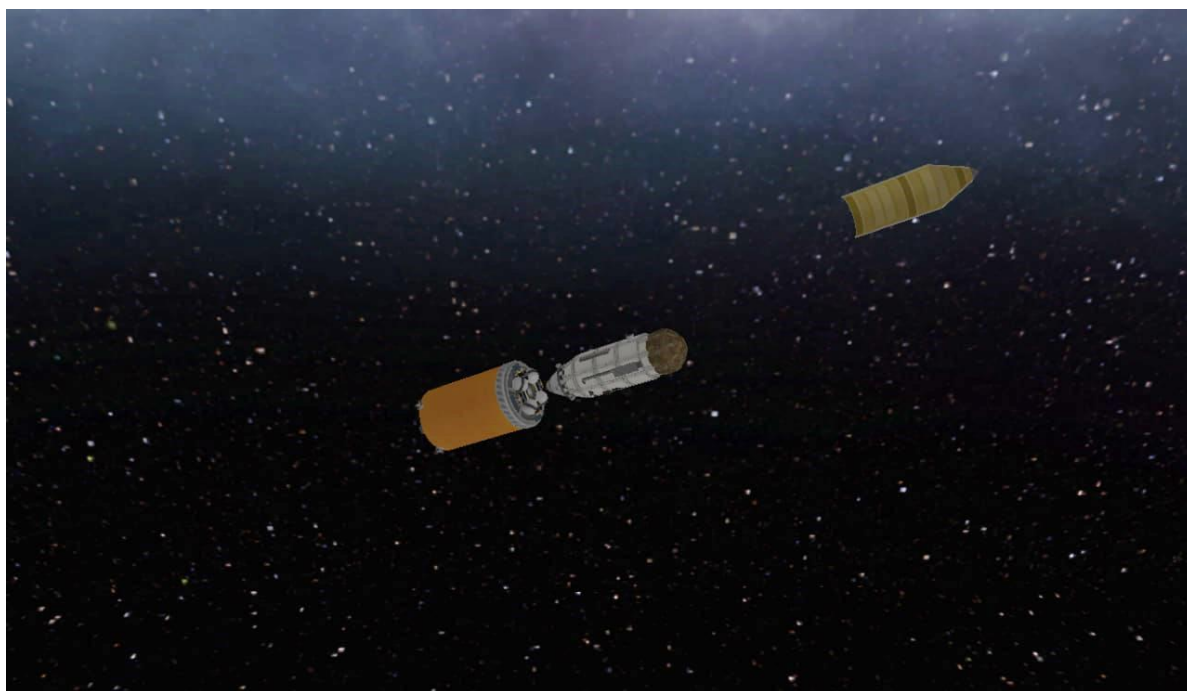


Рисунок 10

Второй этап – выход на орбиту и Гомановский переход (рисунок 11), которые предоставили возможность провести серию точных маневров^[32]. Внимательно производилась корректировка траектории, уделялось особое внимание переходу на II Космическую скорость. Была включена САС на высоте 101,300 м и добавлена точка маневра для совершения Гомановского перехода, который ракета совершила на высоте 112,600 м. После успешного построения траектории отделилась третья ступень.



Рисунок 11

Для вхождения в орбиту Венеры, был совершен последний маневр на высоте 70,000 км. При достижении этой цели двигатели отключились. На подлете к Венере максимальная скорость достигла в 4142 м/с, которая начала уменьшаться при столкновении с атмосферой. На высоте 84 км отсоединился СА (рисунок 12 и рисунок 13). В реальной миссии парашют раскрылся на 55 км, но в KSP максимальная высота, на которой это можно было совершить без вреда - 38,407 м, и скорость - 209.5 м/с, поэтому парашют не раскрылся, а только выпустился.

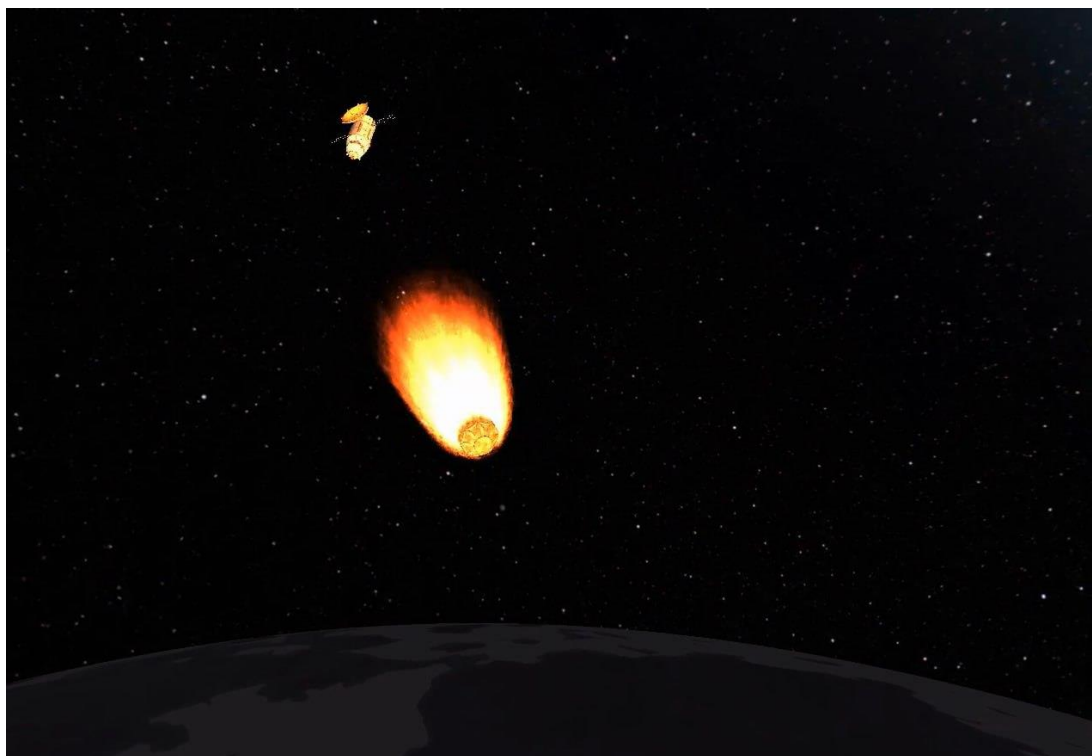


Рисунок 12



Рисунок 13

На высоте 820 м парашют раскрылся (рисунок 14). В этот момент СА имел скорость в 4.6 м/с.



Рисунок 14

Мягкая посадка на поверхность Венеры (рисунок 15).



Рисунок 15

Завершив симуляцию, мы провели тщательное сравнение виртуального полета с данными оригинальной миссии. Виртуальные и реальные маневры сопоставлялись для выявления степени соответствия.

Этот проект стал не только техническим испытанием, но и возможностью погрузиться в атмосферу реальных космических миссий. Виртуальные вызовы и решения, принятые в ходе симуляции, добавили практический опыт и знание в области космической навигации.

Таким образом, симуляция миссии «Венера-7» в KSP представляет собой не только техническую задачу и испытание, но и шаг в направлении погружения в реальные аспекты космической науки.

4 Сравнение симуляции и моделирования

Полученные графики (рисунок 16 и рисунок 17) наглядно показывают, что наши предположения об экспоненциальном росте плотности атмосферы и атмосферного давления с уменьшением высоты оказались верны.

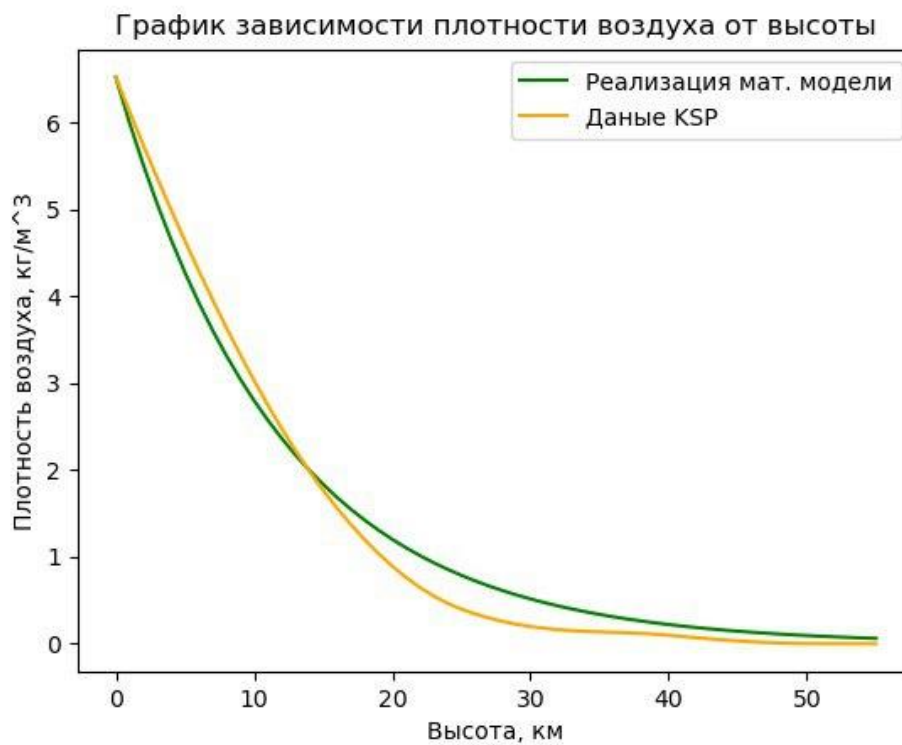


Рисунок 16

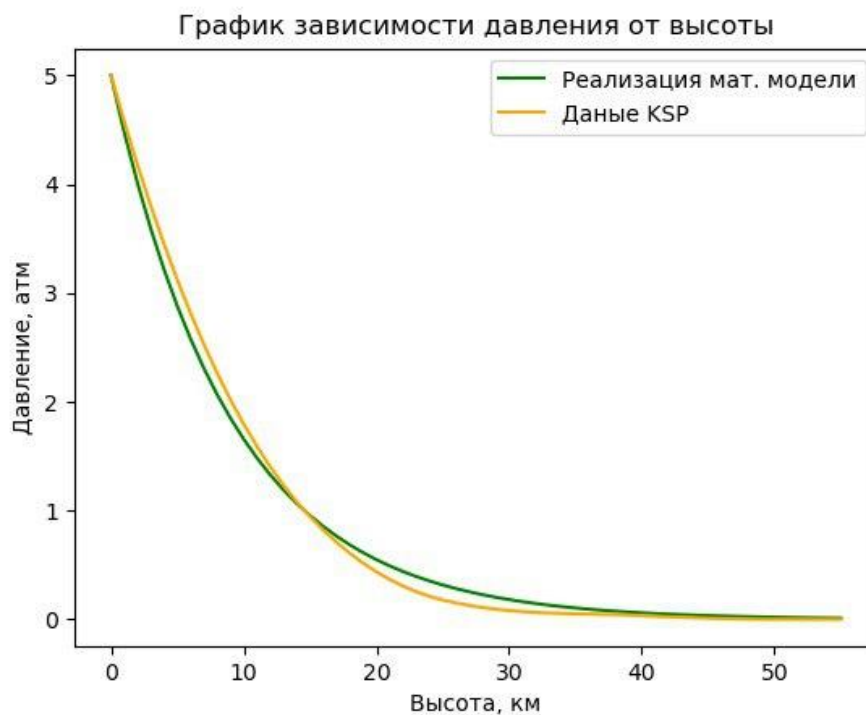


Рисунок 17

Графики практически совпадают. Имеет место быть небольшое отклонение, которое может быть связано с тем, что:

- Возможны малейшие отклонения в процессе симуляции посадки в KSP;
- Некоторые константы, значения которых не получилось найти в характеристиках KSP, были взяты из сети Интернет, вследствие чего они могут отличаться от используемых в симуляторе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итог, стоит отметить, что в процессе выполнения работы была выполнена главная цель нашего исследования, а именно: выявлены зависимости физических характеристик с помощью математической модели, которая была реализована с помощью программного кода, а также проанализирована путем сравнения полученных данных с показаниями из симулятора KSP.

Каждый член команды внес свой вклад в осуществление этого непростого для проекта, а также получил уникальный опыт и приобрел для себя новые полезные навыки в различных сферах.

В приложении А представлена ссылка на репозиторий на платформе GitHub, который позволит подробнее ознакомиться с нашим проектом, его артефактами и используемыми программами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Полеты к Венере: Мы не первые. Мы - единственные. / Мировое обозрение. — URL: <https://tehnovar.ru/79105-polety-k-venere-my-ne-pervye-my-edinstvennye.html> (дата обращения 22-09-2023).
- 2 Основные положения Федеральной космической программы 2016-2025 / Роскосмос. — URL: <https://www.roscosmos.ru/22347/> (дата обращения 21-12-2023).
- 3 РФ запустит зонд к Венере не раньше 2024 г, к Меркурию - после 2031 г / РИА Новости. — URL: <https://web.archive.org/web/20120408000758/http://ria.ru/science/20120407/620510655.html> (дата обращения 22-12-2023).
- 4 Проект Венера-Глоб / Российская академия наук. — URL: <https://web.archive.org/web/20130610010035/http://stp.cosmos.ru/index.php?id=1381> (дата обращения 22-12-2023).
- 5 ESA selects three new mission concepts for study / ESA. — URL: https://web.archive.org/web/20191013052421/http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/ESA_selects_three_new_mission_concepts_for_study (дата обращения 22-12-2023).
- 6 Rocket Lab отложила запуск первого частного венерианского зонда до 2025 года / N+1. — URL: <https://web.archive.org/web/20230607171754/https://nplus1.ru/news/2023/06/07/rocket-lab-venus-2025> (дата обращения 22-12-2023).
- 7 NASA Selects Four Possible Missions to Study the Secrets of the Solar System / Jet Propulsion Laboratory. — URL: <https://web.archive.org/web/20200316085626/https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=7597> (дата обращения 22-12-2023).
- 8 История исследования Венеры / РИА Новости. — URL: <https://ria.ru/20210301/venera-1599095643.html> (дата обращения 21-12-2023).
- 9 Венера - кривое зеркало Земли: АМС Венера-7 / GalSpace. — URL: <https://galspace.spb.ru/index490.html> (дата обращения 22-09-2023).
- 10 К 50-летию первой посадки на Венеру Роскосмос рассекретил часть документов / Хабр. — URL: <https://habr.com/ru/news/533152/> (дата обращения 22-09-2023).
- 11 Укрощение Венеры / Роскосмос. — URL: <https://www.roscosmos.ru/29665/> (дата обращения 22-09-2023).
- 12 «Венера-7»: первая мягкая посадка на Венеру с последующей передачей данных на Землю / Хабр. — URL: <https://habr.com/ru/articles/382471/> (дата обращения 22-09-2023).

13 Рассекречено: укрощение Венеры / Роскосмос. — URL: <https://www.roscosmos.ru/29683/> (дата обращения 22-09-2023).

14 Венера-7 / LiveJournal. — URL: <https://andrey-krasniy.livejournal.com/14165.html> (дата обращения 22-09-2023).

15 Советская программа исследований Венеры / YouTube. — URL: https://www.youtube.com/watch?v=bfh1FfSg_qo (дата обращения 22-09-2023).

16 ПРЕМЬЕРА: Автоматические станции «Венера-7 и -8». Документальный фильм 1973 года / YouTube. — URL: <https://www.youtube.com/watch?v=opaFrbPDH3g> (дата обращения 22-09-2023).

17 2_2 Документальный фильм - Венера-7 и Венера-8 Documentary film - Venera 7 and Venera 8.mp4 / RUTUBE. — URL: <https://rutube.ru/video/fc2ae5446b2e8271e381c8c3a207b811/> (дата обращения 22-12-2023).

18 Автоматическая межпланетная станция «Венера-7» / НПО Лавочкина. — URL: <https://www.laspace.ru/ru/activities/projects/venera-7/> (дата обращения 22-09-2023).

19 Премия за миссию: рассекречены документы о посадке на Венеру / Газета.ru. — URL: https://www.gazeta.ru/science/2020/12/14_a_13400186.shtml (дата обращения 22-09-2023).

20 «ВЕНЕРА-7»: «КОСМОС-359». Часть 1 / LiveJournal. — URL: <https://pilot-pirks.livejournal.com/157503.html> (дата обращения 22-09-2023).

21 Формула силы тяги / webm@th.ru. — URL: https://www.webmath.ru/poleznoe/formules_21_31_sila_tjagi.php (дата обращения 9-09-2023).

22 Космические скорости / Astronet. — URL: <https://www.astronet.ru/db/msg/1177964> (дата обращения 3-10-2023).

23 А.Дроздов. Когда орбита – эллипс // Квант. — 2012. — No. 3. P. 35—38.

24 Константин Эдуардович Циолковский / Архивы Российской академии наук. — URL: https://web.archive.org/web/20190120093625/http://arran.ru/?q=ru%2Fexposition3_1 (дата обращения 20-10-2023).

25 Справка по универсальной газовой постоянной. Единицы измерения универсальной газовой постоянной. Конвектор величин универсальной газовой постоянной.. / Информационный портал. — URL: <https://gidrotgv.ru/spravka-po-universalnoj-gazovoj-postoyannoj-edinicy-izmereniya-universalnoj-gazovoj-postoyannoj-konvektor-velichin-universalnoj-gazovoj-postoyannoj/> (дата обращения 12-09-2023).

26 Определение молярной массы и плотности воздуха: Методические указания к лабораторной работе № 8 по курсу «Физика» для студентов всех форм обучения всех

направлений подготовки / А.Н. Башкатов, В.П. Левченко, Н.Б. Пушкарева; под ред. – проф., д-р физ.- мат. наук А.А. Повзнера. — Екатеринбург, 2015. — 12 с.

27 Venera 7 - Molniya-M - KSP 1.4.5 / YouTube. — URL: <https://www.youtube.com/watch?v=MI7UK6b969k> (дата обращения 1-10-2023).

28 Выход на орбиту | Kerbal Space Program | Тьюториал / YouTube. — URL: https://www.youtube.com/watch?v=4iNLF_dg8r0 (дата обращения 7-10-2023).

29 Летим на EVE | Kerbal Space Program | Тьюториал / YouTube. — URL: <https://www.youtube.com/watch?v=6CUCQKwIbkU&t=285s> (дата обращения 27-10-2023).

30 KSP: ВЕНЕРА-8 (Исследование Венеры) / YouTube. — URL: <https://www.youtube.com/watch?v=1sPiZLfWS0Y&t=842s> (дата обращения 27-10-2023).

31 KSP2 - Historique - Venera 7 / KESA. — URL: <https://kesaspace.blogspot.com/2023/04/ksp2-historique-venera-7.html> (дата обращения 1-10-2023).

32 Ценный дар небесной механики / Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова. — URL: http://crydee.sai.msu.ru/Universe_and_us/4num/v4pap2.htm (дата обращения 22-09-2023).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Видео представление команды InBAPKT и проекта:

<https://www.youtube.com/watch?v=YEFGuYB6xK0>

Репозиторий команды InBAPKT на платформе GitHub (URL):

<https://github.com/Nadezhda13Soloveva/Venus-7>



Рисунок А.1