МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)**



Институт № 8 «Компьютерные науки и прикладная математика» Кафедра 806 «Вычислительная математика и программирование»

**ОТЧЁТ**

По дисциплине:«Введение в авиационную и ракетно-космическую технику» На тему: «Буран»

Оценка: Выполнили:

Подпись преподавателя: Группа М8О-113БВ-24

Воровицкая А.Р.

Кретов А.В.

Хомяков А.С.

Москва, 2024

**СОДЕРЖАНИЕ**

[ВВЕДЕНИЕ 3](#__RefHeading___Toc3875_2316535557)

[1. ОПИСАНИЕ ПРОЕКТА 5](#__RefHeading___Toc3883_2316535557)

[1.1 Цель проекта 5](#__RefHeading___Toc3815_2316535557)

[1.2 Задачи проекта 5](#__RefHeading___Toc3813_2316535557)

[2. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РОЛЕЙ 6](#__RefHeading___Toc3829_2316535557)

[3. ДЕТАЛИ РЕАЛЬНОЙ МИССИИ 7](#__RefHeading___Toc3873_2316535557)

[3.1. Описание аппарата 7](#__RefHeading___Toc3823_2316535557)

[3.2. Предназначение миссии 8](#__RefHeading___Toc3821_2316535557)

[3.3. Детали полёта 8](#__RefHeading___Toc3819_2316535557)

[4. ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ (ФИЗ-МАТ МОДЕЛЬ) 10](#__RefHeading___Toc3817_2316535557)

[5. МОДЕЛИРОВАНИЕ В KERBAL SPACE PROGRAM (KSP) 15](#__RefHeading___Toc3871_2316535557)

[6.1. Конструирование корабля 15](#__RefHeading___Toc3811_2316535557)

[6.2. Написание автопилота 17](#__RefHeading___Toc3825_2316535557)

[7. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ФИЗ-МАТ МОДЕЛИ И KSP 18](#__RefHeading___Toc3869_2316535557)

[8. МЕДИА 20](#__RefHeading___Toc3859_2316535557)

[ЗАКЛЮЧЕНИЕ 21](#__RefHeading___Toc3863_2316535557)

[СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ 22](#__RefHeading___Toc3885_2316535557)

# ВВЕДЕНИЕ

Данная работа посвящена моделированию полёта советского орбитального многоразового транспортного корабля-ракетоплана «Буран», созданного в рамках программы «Энергия — Буран», являющегося ответом на многоразовую систему от США «Space Shuttle», которая могла дать военное преимущество США из-за возможности использования космических челноков с целью нанесения ракетно-ядерных ударов. Главный конструктор корабля-ракетоплана «Бурана» Вячеслав Михайлович Филин заявлял: «Необходимость создания отечественной многоразовой космической системы как средства сдерживания потенциального противника была выявлена в ходе аналитических исследований, проведённых Институтом прикладной математики АН СССР и НПО „Энергия“». Тактико-техническое задание на разработку многоразовой космической системы было выдано Главным управлением космических средств Министерства обороны СССР и утверждено Дмитрием Устиновым 8 ноября 1976 года. Корабль-ракетоплан «Буран» отличался от других космических аппаратов тем, что мог совершать полёт и посадку полностью в автоматическом режиме с использованием бортового компьютера и наземного комплекса радиотехнических систем навигации, посадки, контроля траектории и управления воздушным движением. Производство орбитальных кораблей началось в 1980 году на Тушинском машиностроительном заводе. К 1984 году был готов первый полномасштабный экземпляр, который доставили на аэродром «Юбилейный» космодрома Байконур. Космический полёт «Бурана» состоялся 15 ноября 1988 года. Ракета-носитель «Энергия», стартовавшая с площадки №110 космодрома Байконур, вывела корабль-ракетоплан на околоземную орбиту. Полёт длился 205 минут, за это время «Буран» совершил два витка вокруг Земли, после чего произвёл посадку на аэродроме. В 1990 году работы по программе «Энергия-Буран» были приостановлены, 25 мая 1993 года программу окончательно закрыли решением Совета главных конструкторов при НПО «Энергия». В 2002 году корабль-ракетоплан «Буран» был разрушен при обрушении крыши монтажно-испытательного корпуса на Байконуре, в котором он хранился вместе с готовыми экземплярами ракеты-носителя «Энергия».

## 1. ОПИСАНИЕ ПРОЕКТА

# 1.1 Цель проекта

    Целью данного проекта является создание физико-математической модели и моделирование полёта в Kerbal Space Program корабля-ракетоплана «Буран» с момента взлёта до посадки на аэродроме.

# 1.2 Задачи проекта

1.ыСоздание физико-математической модели полёта.

2.ыМоделирование полёта в Kerbal Space Program (KSP).

3.ыСравнение результатов вычислений физико-математической модели с данными, полученными при моделировании полёта в KSP.

4.ыСделать выводы о проделанной работе.

## 2. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РОЛЕЙ

Команда «Буран»

**Воровицкая А.Р. - тимлид, редактор.** Отвечает за планирование работы, распределение задач между участниками, помощь в случае возникновения трудностей, проверку корректности выполнения задач и достоверности информации, составление и оформление отчёта о проделанной работе.

**Кретов А.В. - математик, физик.** Отвечает за разработку физико-математической модели, составление графиков, сравнение результатов вычислений физико-математической модели с данными, полученными при моделировании полёта в Kerbal Space Program.

**Хомяков А.С. - инженер KSP, программист.** Отвечает за конструирование корабля-ракетоплана «Буран» в Kerbal Space Program, моделирование полёта с момента взлёта до посадки на аэродроме, написание автопилота на языке Python.

## 3. ДЕТАЛИ РЕАЛЬНОЙ МИССИИ

# 3.1. Описание аппарата

Буран состоит из нескольких ключевых частей, каждая из которых выполняет специфические функции:

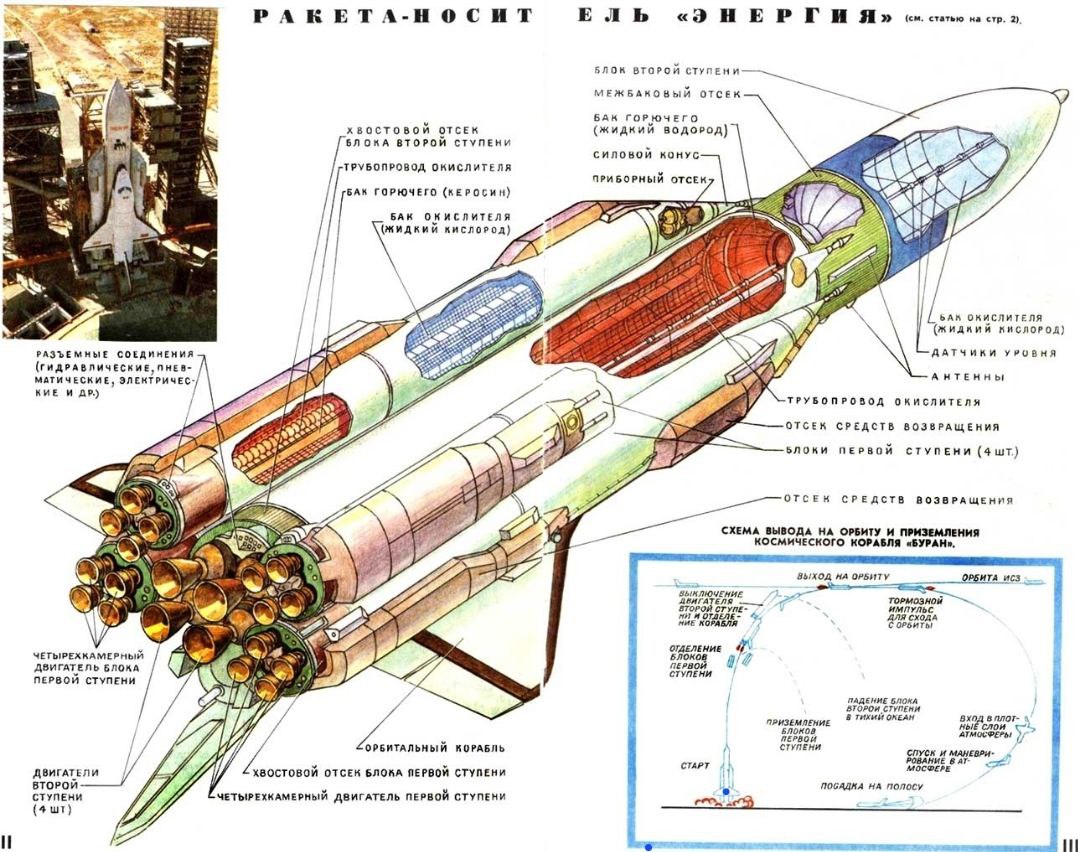
1. Фюзеляж: Основная структура корабля, вмещающая экипаж и оборудование. Он герметичен и обеспечивает защиту от внешней среды.

2. Крыло: Двойное стреловидное крыло с элевонами, обеспечивающее аэродинамические характеристики на сверхзвуковых скоростях.

3. Вертикальное оперение: Содержит руль направления, который помогает управлять полетом.

4. Объединенная двигательная установка (ОДУ): Состоит из двух двигателей для маневрирования и 46 газодинамических двигателей для управления.

5. Кабина: Вмещает до 10 человек и оснащена системами жизнеобеспечения.



# 3.2. Предназначение миссии

Предназначение корабля-ракетоплана «Буран»

1. Выведение на орбиты, обслуживание на них и возвращение на Землю космических аппаратов, космонавтов и грузов.

2. Проведение военно-прикладных исследований и экспериментов по обеспечению создания больших космических систем.

3. Решение различных задач в интересах народного хозяйства и науки.

4. Комплексное противодействие мероприятиям возможного противника по использованию космического пространства в военных целях.

# 3.3. Детали полёта

Ракета-носитель «Энергия» вывела корабль-ракетоплан «Буран» на околоземную орбиту. Полёт длился 205 минут, за это время «Буран» совершил два витка вокруг Земли, после чего произвёл посадку на аэродроме «Юбилейный» космодрома Байконур. Полёт происходил в автоматическом режиме с использованием бортового компьютера и программного обеспечения. Над акваторией Тихого океана «Буран» сопровождали корабль измерительного комплекса ВМФ СССР «Маршал Неделин» и научно-исследовательское судно АН СССР «Космонавт Георгий Добровольский». При взлёте и посадке «Буран» сопровождал истребитель МиГ-25, управлявшийся лётчиком Магомедом Толбоевым. При посадке на высоте около 11 км «Буран», получивший с наземной станции информацию о погоде в месте посадки, совершил резкий манёвр, выполнил дополнительный вираж влево от полосы перед расчётным разворотом на 180º направо. Заходя на посадочную полосу с северо-западного направления, корабль-ракетоплан сел с южного конца против ветра. Из-за крепкого ветра у полосы автоматика «Бурана» гасила таким образом скорость посадки. В момент разворота корабль-ракетоплан пропал из поля зрения наземных средств наблюдения, связь на некоторое время прервалась. Ответственные лица немедленно предложили задействовать аварийную систему подрыва «Бурана» (на корабле-ракетоплане были установлены взрывные заряды, предусмотренные для недопущения крушения секретного космического аппарата на территории другого государства в случае потери курса). Однако заместитель Главного конструктора НПО «Молния» по лётным испытаниям Степан Микоян, отвечавший за управление кораблём-ракетопланом на участке снижения и посадки, принял решение подождать, и автоматическая посадка завершилась благополучно. Изначально система автоматической посадки не предусматривала перехода на ручной режим управления, но пилоты-испытатели и космонавты потребовали у конструкторов добавить ручной режим в систему управления посадкой, что было сделано по их настоянию в виде резервного ручного режима.

## 4. ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ (ФИЗ-МАТ МОДЕЛЬ)

При моделировании полёта корабля-ракетоплана «Буран» будем учитывать, что моделирование происходит в условиях не Солнечной системы, а системы Кербол, представленной в Kerbal Space Program. Таким образом, в процессе моделирования будем учитывать данные именно этой системы.

В рамках физико-математической модели рассмотрим процесс взлёта корабля «Буран» с РН «Энергия» до момента окончательного покидания летательным аппаратом атмосферы Кербина (аналога Земли в Kerbal Space Program).

В рамках физико-математической модели для определения максимальной скорости, которую способен развить корабль-ракетоплан в результате действия реактивного двигателя (двигателей) будем применять формулу Циолковского.

Важно помнить, что расчёт максимально развиваемой аппаратом скорости по формуле Циолковского позволяет получить не точное значение V, а лишь оценку, так как данная формула не учитывает воздействия на тело (корабль «Буран») силы аэродинамического сопротивления и силы тяжести.

В связи с этим, расчёты по формуле Циолковского в ходе работы будут использоваться нами лишь для приблизительной оценки количества топлива, минимально необходимого для осуществления планируемого полёта.

Для одноступенчатого летательного аппарата формула Циолковского имеет вид:

Однако рассматриваемый летательный аппарат является не одноступенчатым, а составным. В связи с этим применим формулу Циолковского иного вида:

Где:

* — конечная скорость летательного аппарата (характеристическая скорость), также обозначаемая как ΔV.
* — число ступеней.
* — номер ступени.
* — удельный импульс ракетного двигателя i-й ступени (отношение тяги двигателя к массовому расходу топлива за секунду)
* — общая масса летательного аппарат. Эта величина представляет собой сумму масс конструкции аппарата и полезной нагрузки, также топлива, предназначенного для использования двигателями этой ступени.
* — конечная масса летательного аппарата. Эта величина представляет собой сумму масс конструкции аппарата и полезной нагрузки.

В массу полезной нагрузки также входит масса топлива, предназначенного для использования двигателями следующих ступеней.

Для корабля-ракетоплана «Буран» число ступеней n = 3: двигатели первой и второй ступени являются частями ракеты-носителя «Энергия», третьей ступени — орбитального корабля «Буран».

Удельный импульс тяги двигателя можно найти по формуле:

[[2]](http://library.krasn.ru/fulltext/Raschet_parametrov.pdf)

Где P — тяга двигателя, — cекундный массовый расход

Секундный массовый расход рассчитывается по формуле:

[[3]](http://library.krasn.ru/fulltext/Raschet_parametrov.pdf)

Где:

* Коэффициент в выражении для расхода:

[[4]](http://library.krasn.ru/fulltext/Raschet_parametrov.pdf)

* площадь критического сечения сопла, рассчитываемая по формуле:

() [[5]](http://library.krasn.ru/fulltext/Raschet_parametrov.pdf)

Где:

* – давление в камере сгорания и на срезе сопла

Характеристики продуктов сгорания:

* коэффициент адиабаты

= 1.4

* температура продуктов сгорания
* диаметр критического сечения сопла
* газовая постоянная

= 8.31

При расчёте траектории полёта летательного аппарата необходимо учитывать действие силы тяжести. Как известно, в соответствии с законом всемирного тяготения, гравитационное ускорение на некоторой высоте над поверхностью астрономического объекта (в данном случае, планеты Кербин) можно найти по формуле:

### Где:

### G — гравитационная постоянная (G ≈ 6,67·10−11 )

* M — масса астрономического объекта
* R — радиус астрономического объекта
* h — высота над поверхностью астрономического объекта до тела

Заметим, что по мере увеличения высоты над поверхностью астрономического объекта гравитационное ускорение, а значит и ускорение свободного падения изменяются незначительно. Будем учитывать это при дальнейшем моделировании.

Воспользуемся вторым законом Ньютона и запишем в векторной форме:

Где:

* P — текущая тяга двигателя (двигателей),
* X — сила лобового сопротивления.

При расчётах учтём, что масса летательного аппарата изменяется во времени.

Как известно,

Массу летательного аппарата, учитывая её зависимость от скорости, раскроем как:

Где — секундный расход топлива, M — масса летательного аппарата с топливом.

Для упрощения вычислений будем считать, что секундный расход топлива — величина постоянная во времени, а M — масса корабля-ракетоплана с РН «Энергия» до начала полёта.

Силу лобового сопротивления можно найти по формуле:

Учитывая вышеперечисленное, уравнение (1) распишем в проекции на ось Oy:

Преобразуем уравнение (2):

Полученное уравнение – квадратное. Решим его.

Будем рассматривать только положительный корень, так как отрицательный не имеет физического смысла.

Воспользуемся барометрической формулой, которая отражает изменение давления с высотой:

Значит, итоговое уравнение для скорости имеет вид:

Где:

* P — тяга двигателя (двигателей),
* — масса летательного аппарата на момент старта
* — секундный расход топлива (кг/с)
* — время
* — нормальное атмосферное давление (На планете Кербин, как и на Земле: 101325 Па) [[1]](https://wiki.kerbalspaceprogram.com/wiki/Kerbin)
* C — коэффициент аэродинамического сопротивления, зависящий от формы тела и выбираемый приближённо (C ≈ 0,4)
* g — ускорение свободного падения (На планете Кербин, как и на Земле: g ≈ 9,81 ) [[1]](https://wiki.kerbalspaceprogram.com/wiki/Kerbin)
* α — угол между направлением силы тяжести и осью Оy
* S — лобовая площадь ракеты
* — газовая постоянная (R = 8.31 )
* h — высота над поверхностью планеты

Чтобы получить приблизительное значение S, учтём, что лобовую площадь ракеты можно приблизительно рассчитать по формуле площади круга:

Радиус R при этом будем считать равным радиусу основания носового обтекателя, вершина которого является наивысшей точкой летательного аппарата в начальный момент времени.

Значит, R = D/2 = 3,75 / 2 = 1,875 (м) [[2]](https://wiki.kerbalspaceprogram.com/wiki/Protective_Rocket_Nose_Cone_Mk12A)

Подставим значение в формулу (4) и произведём расчет:

Значения g, R, , C, S, найденные выше, считаем неизменными во времени и будем использовать при расчёте скорости в каждый момент времени по формуле (2). Аналогично будем учитывать и значение , которое примем равным максимальному секундному расходу топлива двигателями. Такое значение получим из Kerbal Space Program.

Для подсчета результатов физико-математического моделирования применим специально разработанную программа на языке Python, результатом работы которой является построение графика зависимости скорости летательного аппарата относительно поверхности планеты от времени.

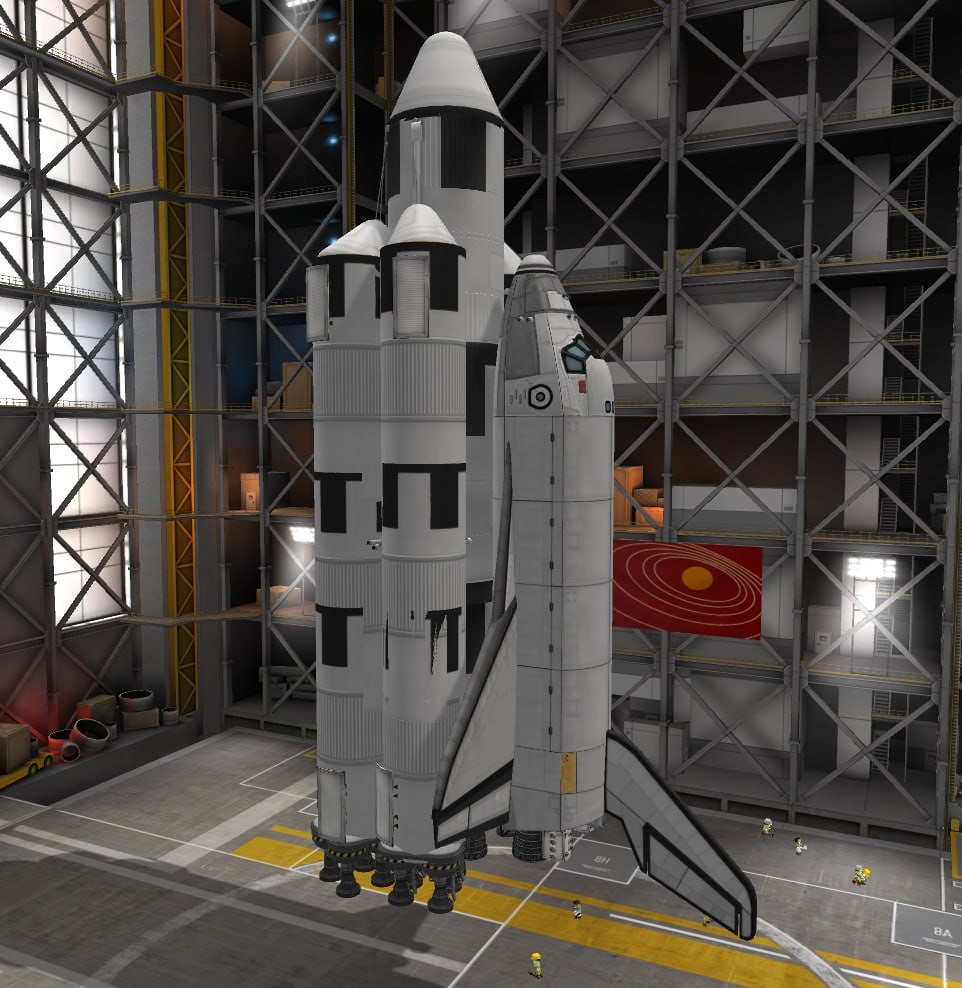
Полученный в результате работы программы график сравним с графиком зависимости скорости аппарата относительно поверхности Кербина от времени, построенным по данным, полученным из симуляции полёта (взлёта) в Kerbal Space Program.

## 5. МОДЕЛИРОВАНИЕ В KERBAL SPACE PROGRAM (KSP)

# 6.1. Конструирование корабля

 1 этап. Построение комплекса «Энергия — Буран»

2 этап. Конструирование 2 ступени «Энергия-Буран»



3 этап. Собранный корабль-ракетоплан «Буран».

# 6.2. Написание автопилота

Написание автопилота включает в себя следующие действия:

1. Подключение к KSP через kRPC

2. Подготовка файлов для записи данных

3. Этап 1: Взлёт

4. Главный цикл для выхода на орбиту

5. Запись координат

6. Снижение тяги при приближении к границам подходящей высоты

7. Этап 2: Круговая орбита

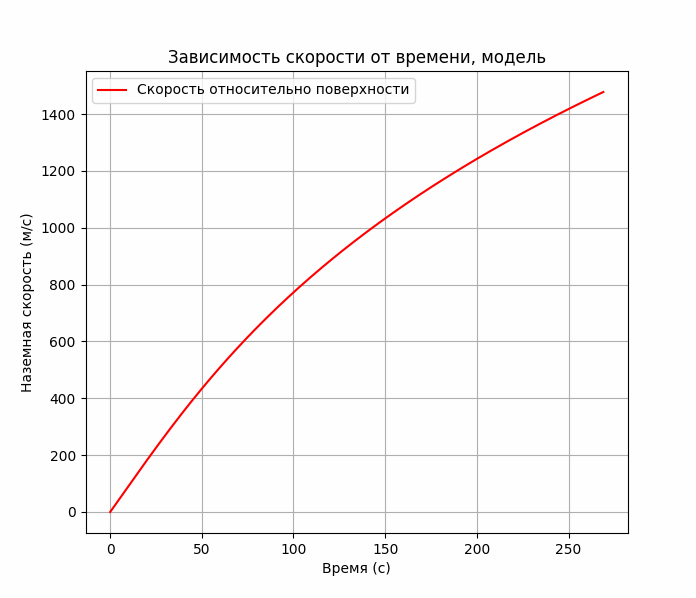
8. Контроль высоты

9. Этап 3: Посадка

10. Завершение миссии

## 7. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ФИЗ-МАТ МОДЕЛИ И KSP

Результат построения графика по физ-мат модели



Результат построения графика по координатам из KSP

# 

В рамках математической модели, используемой для анализа полета ракеты, сила тяги, расход топлива и скорость изменения угла наклона обычно предполагаются постоянными во время полета, что является упрощением реального физического процесса. В действительности эти параметры изменяются во время полёта ракетоплана по различным факторам, как, например, изменение высоты полета, изменение окружающего воздуха или состава топлива, изменение массы ракетоплана и т. д. Таким образом, физико-математическая модель предполагает, что сила тяги, расход топлива и скорость изменения угла наклона остаются постоянными в течение всего полёта и равны их средним значениям. Это позволяет упростить математическую формулировку задачи и проводить аналитические расчёты.

Как результат, графики, полученные с использованием физико-математической модели и модели, построенной на координатах из KSP, показывают одинаковый процесс, но незначительно различаются из-за изменения параметров по различным факторам в течении полёта ракетоплана при его моделировании в KSP. Однако, в середине полета графики могут отличаться от реальности, так как в этом месте происходят изменения значений параметров.

## 8. МЕДИА

1. Проект «Буран» команды «Буран» [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/Anastasia1V/Buran> (Дата обращения: 18.12.2024).

2. Отчёт по проекту «Буран» команды «Буран» [Электронный ресурс]. URL: [https://github.com/Anastasia1V/Buran/blob/main/](https://github.com/Anastasia1V/Buran/blob/main/Отчёт_ВАРКТ)ВАРКТ\_Отчёт.docx (Дата обращения: 18.12.2024).

3. Презентация проекта «Буран» команды «Буран» [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/Anastasia1V/Buran/blob/main/ВАРКТ_Презентация.pptx> (Дата обращения: 18.12.2024).

4. Физико-математическая модель на Python [Электронный ресурс]. URL: [https://github.com/Anastasia1V/Buran/blob/main/](https://github.com/Anastasia1V/Buran/blob/main/ВАРКТ_Презентация.pptx)Физмат\_модель.py (Дата обращения: 18.12.2024).

5. Модели на основе координат, полученных в Kerbal Space Program, на Python [Электронный ресурс]. URL: [https://github.com/Anastasia1V/Buran/blob/main/](https://github.com/Anastasia1V/Buran/blob/main/ВАРКТ_Презентация.pptx)Координатная\_модель.py (Дата обращения: 18.12.2024).

6. Автопилот на Python [Электронный ресурс]. URL: [https://github.com/Anastasia1V/Buran/blob/main/](https://github.com/Anastasia1V/Buran/blob/main/ВАРКТ_Презентация.pptx)autopilot.py (Дата обращения: 18.12.2024).

7. Видеоотчёт команды «Буран» [Электронный ресурс]. URL: [https://github.com/Anastasia1V/Buran/blob/main/](https://github.com/Anastasia1V/Buran/blob/main/ВАРКТ_Презентация.pptx)Ссылка\_на\_видеоотчёт.txt (Дата обращения: 18.12.2024).

8. Моделирование в Kerbal Space Program [Электронный ресурс]. URL: [https://github.com/Anastasia1V/Buran/blob/main/Ссылка\_на\_видео\_моделирование\_KSP.txt](https://github.com/Anastasia1V/Buran/blob/main/ВАРКТ_Презентация.pptx) (Дата обращения: 18.12.2024).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения проекта были построены и сравнены модель на основе физико-математических расчётов и модель на основе координат, полученных в результате моделирования полёта в Kerbal Space Program, которые отображают зависимость скорости аппарата относительно поверхности планеты от времени полёта.

## **СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Википедия «Буран (космический корабль)» [Электронный ресурс]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D1%83%D1%80%D0%B0%D0%BD\_(%D0%BA%D0%BE%D1%81%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9\_%D0%BA%D0%BE%D1%80%D0%B0%D0%B1%D0%BB%D1%8C) (Дата обращения: 10.11.2024).

2. Википедия «Космическая программа СССР» [Электронный ресурс]. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D1%81%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F\_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%BC%D0%B0\_%D0%A1%D0%A1%D0%A1%D0%A0#%D0%91%D1%83%D1%80%D0%B0%D0%BD](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D1%81%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%BC%D0%B0_%D0%A1%D0%A1%D0%A1%D0%A0" \l "%D0%91%D1%83%D1%80%D0%B0%D0%BD) (Дата обращения: 10.11.2024).

3. Космический корабль Буран [Электронный ресурс]. URL: [buran.ru](https://buran.ru/) (Дата обращения: 10.11.2024).

4. РКК «ЭНЕРГИЯ» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.energia.ru/> (Дата обращения: 14.11.2024).

5. Циолковский К. Э. «Труды по ракетной технике» / Под редакцией М. К. Тихонравова. — М.: Оборонгиз, 1947. — С. 33.

6. Раздел модов для Kerbal Space Program [Электронный ресурс]. URL: <https://spacedock.ru/kerbal-space-program/mods-ksp/> (Дата обращения: 10.11.2024).