Министерство науки и высшего образования российской федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

(МАИ)

Команда «Русы»

УДК 004.942

ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

ОЧИСТКА ОРБИТЫ ОТ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

(заключительный)

Оценка: \_\_\_\_\_\_

Дата: \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Подпись преподавателя: \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Москва, 2023

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель НИР,

математик, студент группы

М8О-112Б-23 Ю.Е. Канева

Специалист по KSP,

студент группы М8О-112Б-23 Н.О. Ильинский

Медиа-продюсер, студент

группы М8О-111Б-23 Т.С. Соболин

Копирайтер, студент

группы М8О-111Б-23 Д.А. Лапин

РЕФЕРАТ

Отчёт 25с., 1 кн., 3 рис., 1 табл., 13 источн., 2 прил.

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, СРАВНЕНИЕ ДАННЫХ, KERBAL SPACE PROGRAM (KSP), ОТЛИЧИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

Объектом исследования является космическая миссия по очистке орбиты Земли.

Цель работы – моделирование попадания ракетой по крупному искусственному космическому объекту, не имеющему возможность больше служить людям и находящемуся на орбите Земли, и сравнение данных имитационной и математической модели этой миссии.

В процессе работы использовался математический и имитационный метод исследования.

В результате исследования был разработан и запущен имитационный космический аппарат (КА) с миссией вывода космического мусора с орбиты Земли.

Разработана математическая модель по выводу мусора с орбиты после стыковки КА с этим объектом.

Получены данные полета имитационной модели и математической модели.

Было произведено сравнение результатов, полученных в результате расчетов математической модели и запуска имитационной модели в Kerbal Space Program (KSP).

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ5

1 МЕТОД ВЫВОДА КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА С ОРБИТ 7

2 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ8

3 СИМУЛЯЦИЯ КОСМИЧЕСКОЙ МИССИИ**12**

3.1 ОПИСАНИЕ ИМИТАЦИОННОГО КА12

3.2 РЕЗУЛЬТАТЫ СИМУЛЯЦИИ15

1. СРАВНЕНИЕ ГРАФИКОВ16
2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ18

6 РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ КАЖДОГО ИЗ УЧАСТНИКОВ19

ЗАКЛЮЧЕНИЕ22

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 23

ПРИЛОЖЕНИЕ А24

ПРИЛОЖЕНИЕ Б25

ВВЕДЕНИЕ

Запуск первого искусственного спутника Земли в 1957 году положил начало новой космической эры в истории человечества, принёсшей новые возможности, знания и технологии, прочно вошедшие в повседневную жизнь современного человека. Однако, в результате космической деятельности за прошедшие 60 лет на околоземных орбитах скопились сотни тысяч объектов искусственного происхождения [1]: ступеней ракет, нефункционирующих КА, разгонных блоков, кусков обшивки, частиц, краски, топлива, которые называются космическим мусором [2, 3, 4] (рисунок А).

Такая актуальная тема как очистка орбиты Земли от космического мусора заинтересовала нас. Актуальность этой проблемы была доказана еще в 1987 году американским астрофизиком и специалистом НАСА Дональдом Кесслером. Он рассмотрел возможные последствия неконтролируемого увеличения количества искусственных объектов на орбите. Рассмотренный им сценарий, названный позже его именем – эффект Кесслера, показал возможность лавинообразного роста космического мусора, который может быть инициирован столкновением всего двух крупных объектов. Это единственное событие может запустить «цепную реакцию» столкновений образовавшихся фрагментов с другими объектами, что может привести к практической недоступности некоторых орбит и массовому выходу из строя существующих КА [5].

Так, основная цель миссии: моделирование попадания ракетой по крупному искусственному космическому объекту, не имеющему возможность больше служить людям и находящемуся на орбите Земли, и сравнение данных имитационной и математической модели этой миссии.

Задачи:

1. Изучить статьи и найти исследования на тему очистки орбиты Земли от мусора.
2. Составить математическую модель.
3. Смоделировать полёт в KSP.
4. Сравнить полученные результаты.
5. Составить отчёт миссии.
6. Презентовать проект.
7. МЕТОД ВЫВОДА КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА С ОРБИТЫ

Существует множество способов вывода космического мусора с орбиты, мы рассмотрим разновидность активного метода – контактный метод. Контактные методы предполагает захват и увод объекта космического мусора с непосредственным механическим взаимодействием при помощи стыковочного устройства, манипулятора, сети, гарпуна. Общая схема увода космического мусора предполагает этапы дальнего и ближнего наведения, этап захвата космического мусора – формирование механической связи, этап стабилизации связки и следующего за этим увода всей связки с орбиты. Наиболее сложным этапом является этап захвата космического мусора. Космический мусор в общем случае не имеет специальных стыковочных устройств и может вращаться с большой угловой скоростью, поэтому технология захвата такого объекта принципиально отличается от отработанной технологии стыковки двух объектов на орбите. На сегодняшний день предложено несколько способов захвата объекта космического мусора [2, 4].

Эти способы можно разделить на две группы:

- способы, использующие жёсткую связь;

- способы, использующие гибкую связь.

К первой группе относятся способы, использующие различные механические манипуляторы или специализированные устройства захвата [2]. Такой способ мы и будем использовать. Это обусловлено возможностями используемой нами программой (KSP).

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Таблица 1 - Используемые постоянные

|  |  |
| --- | --- |
| Названия | Значения |
| ra1 - апофокусное расстояние орбиты в момент стыковки корабля с мусором | 7249 км |
| rp1 - перифокусное расстояние орбиты в момент стыковки корабля с мусором | 6470 км |
| a1 - большая полуось орбиты в момент стыковки | 6 860 км |
| с1 – фокальное расстояние в момент стыковки | 390 км |
| µ - гравитационный параметр земли | 398600,43 км3/с2 |
| e1 - эксцентриситет орбиты в момент стыковки | 0,0569 |
| p1 – фокальный параметр орбиты в момент стыковки | 6838 км |

МОДЕЛЬ ВЫВОДА МУСОРА С ОРБИТЫ ПОСЛЕ СТЫКОВКИ:

Если КА движется по орбите вокруг массивного сферического тела и на него не действуют возмущения со стороны других тел, то это означает, что КА движется в центральном поле сил. При этом если полет КА является пассивным (двигатели выключены), то его орбита представляет собой коническое сечение. При работающем двигателе орбита будет изменяться. Полагая, что мы имеем дело с двигателями, развивающими большую тягу, можно считать, что двигатель работает такое короткое время, за которое создаваемый им импульс мгновенно изменяет вектор количества движения КА, а положение КА измениться не успевает. При этом нет никаких гравитационных потерь. Будем считать орбиту КА эллиптической.

Удобнее всего рассматривать эту задачу как задачу изменения энергии КА, движущегося по орбите. Воспользовавшись интегралом энергии, можно записать для орбиты следующее соотношение [6]:

(1)

Где

– энергия системы корабль-мусор.

V1 - скорость на начальной орбите в точке апоцентра.

(2)

Теперь необходимо рассчитать орбиту для спуска. Апоцентр орбиты и орбиты спуска совпадают. Тогда перицентр должен находиться на уровне моря, следовательно, радиус земли равен перифокусному расстоянию:

(3)

Тогда большая полуось новой орбиты рассчитывается по формуле [6]:

(4)

Фокальное расстояние орбиты спуска:

(5)

Эксцентриситет орбиты спуска:

(6)

Малая полуось:

(7)

Фокальный параметр новой орбиты:

(8)

Эллиптической орбите перехода соответствует энергия [7]:

(9)

Где

(10)

Таким образом, в точке апоцентра энергию КА необходимо уменьшить на величину:

(11)

С другой стороны, изменения энергии обусловлены только изменениями кинетической энергии, поскольку импульс действует очень короткое время и положение КА не успевает измениться. Таким образом, имеем [6]:

(12)

Отсюда получаем:

(13)

Время, за которое корабль упадёт на землю, равно времени, которое требуется, чтобы долететь от перицентра в апоцентр, и его можно рассчитать по формуле:

(14)

Из уравнения Кеплера [10] и предыдущего уравнения можем найти время, за которое вектор соединяющий центр орбиты и корабль составит с большей полуосью угол E (приложение Б):

(15)

Рассмотрим орбиту в полярных координатах, если центр земли взять за полюс, а большую ось за полярную ось. Тогда расстояние от центра земли в зависимости от угла можно рассчитать по формуле (погрешность 3%) [8]:

(16)

Из системы последних двух уравнений, можем построить график (рисунок 1).

Рисунок 1 – График изменения расстояния до центра Земли от времени, основанный на данных математической модели

1. СИМУЛЯЦИЯ КОСМИЧЕСКОЙ МИССИИ

Для успешной реализации поставленной задачи, было необходимо построить имитационную модель КА, способную справиться с миссией. Было решено сконструировать КА, состоящий из 5 ступеней, общей массой в 60.065 т.

* 1. ОПИСАНИЕ ИМИТАЦИОННОГО КА

Основные характеристики:

- Название: Project\_ship

- Тип: Тяжёлая ракета [11]

- Конструкция: Пятиступенчатая

- Масса: 60.065 тонн

- Длина: 21.9 метров

- Диаметр: 4.2 метра

Ступени:

1) Первая ступень:

- Двигатель: «Вертлявый»

- Топливо: жидкое, 1.8 тонн

- Тяга: 168 кН

- ∆V: 2025 м/с

Данная ступень участвует в Гомановском переходе (сближение с целью) и в «возвращении» мусора на Землю.

Кроме того, 1-я ступень несет на себе защитный обтекатель AE-FF1, расположенный прямо на носу КА. Под ним находятся малое усовершенствованное устройство захвата и блок удаленного управления RC-001S. На 1-ой ступени закреплены 8 блоков двигателей РСУ RV-105, нужные для маневрирования в космосе во время работы 1-ой ступени. Для функционирования РСУ используется монотопливо, хранящееся в монотопливном баке FL-R120.

2) Вторая ступень:

- Двигатель: «Факел»

- Топливо: жидкое, 0.9 тонны

- Тяга: 205 кН

- ∆V: 519 м/с

Во время работы 2–ой ступени защитный обтекатель AE-FF1 раскрывается. 4 стандартных стабилизатора находятся на этой ступени и корректируют движение ракеты на протяжении действия каждой ступени, кроме 1–ой.

3) Третья ступень:

- Двигатели: 4 двигателя «Креветка»

- Топливо: твердотельное, 0.67 тонн на двигатель

- Тяга: 106 кН

- ∆V: 380 м/с

Ступень участвует в покидании атмосферы.

4) Четвертая ступень:

- Двигатели: 4 двигателя «Кувалда»

- Топливо: твердотельное, 6.15 тонн на двигатель

- Тяга: 650 кН

- ∆V: 1337 м/с

Ступень участвует в покидании атмосферы.

5) Пятая ступень:

- Двигатели: 4 двигателя «Молот»

- Топливо: твердотельное, 2.81 тонны на двигатель

- Тяга: 688 кН

- ∆V: 346 м/с

Ступень участвует в покидании атмосферы.

* 1. РЕЗУЛЬТАТЫ СИМУЛЯЦИИ

Основываясь на данных полученных в результате проведения симуляции миссии, построим график зависимости расстояния до центра Земли от времени (рисунок 2):

Рисунок 2 – График зависимости расстояния до центра Земли от времени, основанный на данных полученных из KSP

1. СРАВНЕНИЕ ГРАФИКОВ

График математической модели (рисунок 1):

Рисунок 1 – График изменения расстояния до центра Земли от времени, основанный на данных математической модели

График имитационной модели (рисунок 2):

Рисунок 2 – График зависимости расстояния до центра Земли от времени, основанный на данных полученных из KSP

Данные графики очень похожи. Можно заметить аналогичную зависимость на каждом из них. Медленное сближение с Землей в первые секунды. Затем быстрое снижение на протяжении почти всего временного отрезка. И замедление под конец измерений.

1. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Результатами работы, в которой использовался математический и имитационный метод исследования, является наглядное сравнение данных, полученных из практической реализации этих двух методов.

Для реализации математического метода была разработана математическая модель вывода космического мусора с орбиты после стыковки КА с этим объектом.

Имитационная часть работы была выполнена в программе KSP, в которой был построен и запущен КА. Этот КА был выведен на орбиту, на которой он успешно состыковался с космическим объектом, играющим роль космического мусора, и увел его с орбиты Земли.

Так, собрав данные симуляции и математической модели, мы использовали графики, чтобы сравнить их. Преимущество этого подхода заключается в том, что график наглядно показывает изменения на протяжении всего времени измерения, что дает понять, как менялось состояние объекта исследования на протяжении времени.

В результате сравнения было выяснено, что имитационная миссия проходит с тем же результатом, что при расчетах математической модели, то есть результаты симуляции совпадают с результатами, полученными в теоретической части.

Нам удалось справиться с объемной работой, содержавшей множество задач и препятствий. Несмотря на все трудности все поставленные задачи были выполнены.

1. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ КАЖДОГО ИЗ УЧАСТНИКОВ

Канева Юлия:

Роль в команде – тимлид, математик. Во время работы была ключевым звеном команды. Она организовала связь участников между собой, что обеспечивало их корректную и эффективную работу, и определила цели и задачи этого проекта. Юлия смогла составить план действий и распределила роли в команде так, что каждый отвечал за ту часть, в которой он был силен. Она составила математическую модель вывода космического мусора с орбиты КА. Предоставила все необходимые данные для составления графика математической модели. Проанализировала графики, выявила сходства и различия. Составила краткое описание проделанной работы для составления главного отчета.

Ильинский Никита:

Роль в команде – специалист KSP. Он разработал сценарий работы в KSP, соответствующего целям и задачам миссии по очистке орбиты от космического мусора. Никита учел особенностей KSP для достижения максимальной реалистичности. Собрал КА, способный справиться с поставленной задачей. Провел полет имитационного КА, выполнявшего миссию по выводу мусора с орбиты Земли. Чтобы успешно провести этот полет ему было необходимо учесть физические параметры и ограничения KSP.

Составил отчет имитационного моделирования тимлиду. Участвовал в сравнительном анализе результатов, полученных в KSP, с данными математической модели. Никита создал видеоролик, использованный в презентации проекта.

Тестирование различных сценариев в KSP для проверки стабильности и надежности моделирования.

Соболин Тимофей:

Роль в команде - медиа-продюсер. В его обязанности входила разработка медийной концепции проекта. Во время работы над этим он учел ключевые моменты и цели миссии по очистке орбиты от космического мусора. Другой его задачей было производство графических элементов, иллюстраций и анимации, отображающих ключевые этапы работы команды от разработки моделей до имитационного моделирования в KSP. Тимофей создал информативный видеоролик, документирующий процесс исследования и работы команды, а также демонстрирующих результаты проделанной работы.

Он подготовил: презентацию для защиты данного проекта, материалы для отчета, включая графики и иллюстрации, визуализирующие результаты исследования. Тимофей было необходимо собирать обратную связь и корректировки от участников проекта для обеспечения соответствия медийных материалов общей концепции проекта.

Лапин Данил:

Роль в команде – копирайтер. В его задачи входило составление текстового описания проекта, то есть написание информативного и увлекательного текстового описания проекта, отражающего его суть, цели и важность в контексте решения проблемы космического мусора. В процессе написания особенное внимание уделялось соответствию ГОСТу 7.32 от 2017 года. Вся информация структурировалась согласно требованиям вышеприведенного ГОСТа. Им была проведена работа над текстовыми материалами для презентаций: скрипты для устных выступлений, обеспечивающих ясное и точное представление информации.

Подготовка материалов для медийных публикаций:

Составление текстов для публикаций в научных и медийных изданиях, раскрывающих методологию и результаты исследования. Данил оптимизировал текст под ключевые слова: внедрил ключевые слова и термины в тексты для оптимизации поисковых запросов, то есть для увеличения видимость проекта в онлайн-пространстве. Он обеспечил стиль и единство работы. Для достижения всего этого ему было необходимо взаимодействовать с другими членами команды, в том числе с тимлидом, математиком, специалистом по KSP и медиа-продюсером, для обеспечения соответствия текстов общей стратегии проекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования использовались математический и имитационный методы для анализа вывода космического мусора с орбиты. Разработана математическая модель увода мусора после стыковки с КА. Имитационная модель выполнена в KSP, где успешно проведены стыковка и вывод мусора с орбиты Земли.

Сравнение данных симуляции и математической модели осуществлено с использованием графиков. Этот метод обеспечивает наглядное отображение изменений в течение времени измерения, демонстрируя согласованность результатов.

Результаты сравнения показали, что имитационная миссия соответствует расчетам математической модели. Таким образом, симуляция и теоретическая часть дали совпадающие результаты.

Несмотря на сложности, достигнуты все поставленные задачи, что подчеркивает успешное выполнение объемной работы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Bolonkin A. New methods of removing space debris - N.Y., 2014. – P. 2.
2. Shan M., Guo J., Gill E. Review and comparison of active space debris capturing and removal methods // Progress in Aerospace Sciences, 2015, vol. 80, pp. 18 – 32.
3. Трушляков В.И., Юткин Е.А. Обзор средств стыковки и захвата объектов крупногабаритного космического мусора // Омский научный вестник. 2013. № 2. C. 56 – 61.
4. Pelton J.N. New solutions for the space debris problem, Springer, 2015, 94 p.
5. Kessler D.J., Cour-Palais B.G. Collision frequency of artificial satellites: the creation of a debris belt // Journal of geophysical research, 1978, vol. 83, pp. 2637 - 2646.
6. Мирер С.А. Механика космического полета. Орбитальное движение: учебное пособие, М: Резолит, 2007, Часть II, С. 115 – 121.
7. Суханов А.А. Астродинамика, М: Ин-т космических исследований РАН, 2010.
8. Корн Г., Корн Т. Свойства окружностей, эллипсов, гипербол и парабол // Справочник по математике. — 4-е издание. — М.: Наука, 1978. — С. 70—73.
9. Wood A. Gravity by Alfonso Cuarón // Science Fiction Film and Television, 2014, vol. 7, no. 3, pp. 441 – 444.
10. Мирер С.А. Механика космического полета. Орбитальное движение: учебное пособие. - М: Резолит, 2007, C. 49-50.
11. Осипов Ю.С. Большая Российская энциклопедия. - М: Большая Российская энциклопедия, 2004.
12. Клюшников В.Ю. Как очистить околоземное пространство от космического мусора. - М: 2019.
13. Пикалов Р.С., Юдинцев В.В. Обзор и выбор средств увода крупногабаритного космического мусора. – М: Труды МАИ, 2018.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А

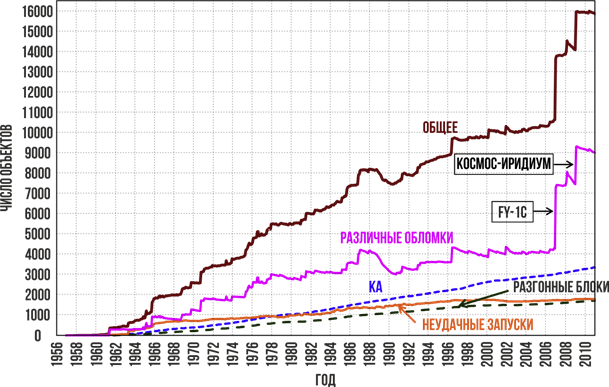


Рисунок А - Рост числа объектов искусственного происхождения на околоземной орбите [9]

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

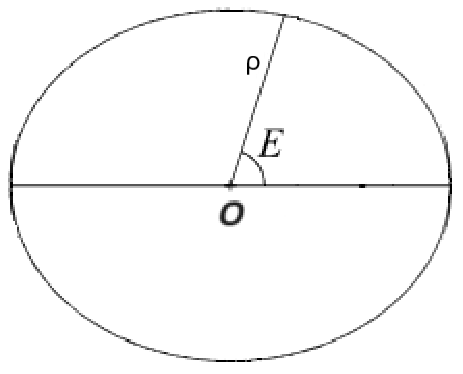


Рисунок Б – О – центр орбиты. – расстояние до центра Земли. Е – угол между нормалью, расстоянием, и орбитой.