

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»**

УТВЕРЖДЕНО

**Директор физтех-школы
прикладной математики и
информатики**

А.М. Райгородский

Рабочая программа дисциплины (модуля)

по дисциплине:	Динамика космического полёта
по направлению:	Техническая физика
профиль подготовки:	Техническая физика космических летательных аппаратов Физтех-школа Аэрокосмических Технологий кафедра математического моделирования и прикладной математики
курс:	3
квалификация:	бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 5 (осенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 15 час.

Всего часов: 45, всего зач. ед.: 1

Программу составил: М.Ю. Овчинников, д-р физ.-мат. наук, профессор

Программа обсуждена на заседании кафедры математического моделирования и прикладной математики
15.05.2020

Аннотация

В доступной форме изложены основы динамики космического полета. Рассмотрено движение центра масс небесных тел и космических аппаратов. Представлены элементы теории невозмущенных и возмущенных движений, основы теории маневрирования, относительного движения в группе, коррекции межпланетных траекторий, гравитационных маневров, определения элементов орбиты по наблюдениям.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

Ознакомить студентов с законами движения тел в космическом пространстве. Научить основным способам расчета траекторий в центральном поле, в полях тяготения нескольких тел, в поле несферичной планеты. Научить методам анализа движения спутника относительно его центра масс. Дать понятие о анализе возмущенных движений и методах корректировки орбит.

Задачи дисциплины

- приобретение теоретических знаний в области движения тел в космическом пространстве;
- приобретение теоретических знаний в области анализа движения спутников относительно центра масс;
- приобретение практических навыков при различных способах расчета траекторий и их коррекции.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач	УК-1.1 Анализирует задачу, выделяя этапы ее решения, действия по решению задачи
	УК-1.2 Находит, критически анализирует и выбирает информацию, необходимую для решения поставленной задачи
	УК-1.3 Рассматривает различные варианты решения задачи, оценивает их преимущества и недостатки
	УК-1.4 Грамотно, логично, аргументированно формирует собственные суждения и оценки
	УК-1.5 Определяет и оценивает практические последствия возможных вариантов решения задачи
ОПК-7 Способен самостоятельно осваивать современную физическую, аналитическую и технологическую аппаратуру различного назначения и работать на ней	ОПК-7.1 Понимает принципы работы используемой физической, аналитической и технологической аппаратуры
	ОПК-7.2 Владеет навыками безопасной работы с современной физической, аналитической и технологической аппаратурой
	ОПК-7.3 Проводит эксперимент с использованием физической, аналитической и технологической аппаратуры

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

Основные законы динамики космического полёта.

уметь:

Рассчитывать траектории космического аппарата в центральном поле, анализировать возмущенное движение центра масс космического аппарата.

владеть:

Методами теоретической механики и дифференциальных уравнений для составления уравнений движения космического аппарата.

4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Введение в предмет	2			1
2	Невозмущенное движение.	2			1
3	Теория возмущенного движения	2			1
4	Оскулирующие элементы	2			1
5	Уравнения в оскулирующих элементах как инструмент исследования возмущенного движения	3			1
6	Влияние несферичности Земли на движение искусственного спутника.	3			1
7	Основы теории маневрирования КА.	3			1
8	Групповые полеты (Formation Flying) и созвездия (Constellation) спутников	2			1
9	Коррекция межпланетных траекторий.	2			1
10	Гравитационные маневры.	3			2
11	Классификация систем ориентации.	3			2
12	Использование асимптотических методов для приближенного решения задач небесной механики	3			2
Итого часов		30			15
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		45 час., 1 зач.ед.			

4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 5 (Осенний)

1. Введение в предмет

Введение в предмет. Современные миссии и проекты.

2. Невозмущенное движение.

Невозмущенное движение (задача двух тел). Уравнения движения. Первые интегралы движения (интеграл энергии, интеграл площадей, интеграл Лапласа). Связь между интегралами движения. Уравнение орбиты. Уравнение Кеплера. Законы Кеплера. Большая полуось как мера энергии. Элементарные маневры. Эллипс Гомана. Первая космическая (круговая) скорость. Вторая космическая (параболическая) скорость.

3. Теория возмущенного движения

Теория возмущенного движения. Задача n -тел. Десять первых интегралов, плоскость Лапласа. Планетная форма уравнений относительного движения. Пертурбационная функция. Задача трех тел. Лагранжевы и эйлеровы точки либрации, их устойчивость, практическое использование точек либрации. Ограниченная задача трех тел. Интеграл Якоби, поверхность нулевой относительной скорости, эволюция сечений поверхности нулевой скорости, межпланетные перелеты на примере миссий Земля-Луна. Грависферы. Сфера притяжения, сфера действия. Использование грависфер при конструировании межпланетных траекторий.

4. Оскулирующие элементы

Оскулирующие элементы. Уравнения возмущенного движения в оскулирующих элементах. Приближенные уравнения при малых возмущениях.

5. Уравнения в оскулирующих элементах как инструмент исследования возмущенного движения

Уравнения в оскулирующих элементах как инструмент исследования возмущенного движения. Торможение спутника в атмосфере Земли.

6. Влияние несферичности Земли на движение искусственного спутника.

Влияние несферичности Земли на движение искусственного спутника. Гравитационное поле несферичной Земли. Возмущающее ускорение. Эволюция орбиты спутника в поле полярно-сжатой Земли (влияние гармоник J_2). Эволюция орбиты экваториального спутника, прецессия наклоненной орбиты, связь с теорией гироскопа, практическое использование эволюции орбиты. Солнечно-синхронная орбита для систем наблюдения Земли из космоса, высокоапогейные орбиты спутников типа «Молния». Геостационарный спутник. Влияние экваториального сжатия Земли на положение точек стояния геостационарных спутников.

7. Основы теории маневрирования КА.

Основы теории маневрирования КА. Характеристическая скорость. Маневры изменения ориентации плоскости орбиты (наклонение и аргумент восходящего узла). Оптимальное положение точки приложения импульса. Маневр в плоскости орбиты. Изменение периода обращения КА по орбите. "Цена" маневра.

8. Групповые полеты (Formation Flying) и созвездия (Constellation) спутников

Групповые полеты (Formation Flying) и созвездия (Constellation) спутников. Принципы построения. Сближение и стыковка на орбите. Уравнения относительного движения в орбитальной системе координат. Интегрирование уравнений движения. Влияние возмущений на относительное движение спутников. Примеры миссий.

9. Коррекция межпланетных траекторий.

Коррекция межпланетных траекторий. Движение КА в окрестности планеты назначения. Картинная плоскость. Гелиоцентрический участок номинальной траектории КА. Эллипсоид влияния. Матрица маневра. Свойства коррекции. Нуль-направление. Плоскость оптимальной коррекции. Двухпараметрическая коррекция. Об оптимальном положении точки коррекции на траектории. Вырождение матрицы маневра.

10. Гравитационные маневры.

Гравитационные маневры. Прицельная дальность. Изменение наклона плоскости гелиоцентрической орбиты. Использование гравитационных маневров в современных межпланетных миссиях.

11. Классификация систем ориентации.

Классификация систем ориентации. Моменты, действующие на КА, и их использование для управления ориентацией. Движение КА в гравитационном поле. Положения равновесия. Движение КА в магнитном поле. Управление движением малых спутников относительно центра масс с использованием токовых катушек и маховиков.

12. Использование асимптотических методов для приближенного решения задач небесной механики

Использование асимптотических методов для приближенного решения задач небесной механики. Метод Ван-дер-Поля.

5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Учебная аудитория, оснащенная компьютером и мультимедийным оборудованием (проектор, звуковая система).

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Лекции по динамике космического полета [Текст] : учеб. пособие для вузов / Б. В. Раушенбах, М. Ю. Овчинников ; М-во общ. и проф. образования Рос. Федерации, Моск. физико-техн. ин-т (гос. ун-т) .— М. : МФТИ, 1997 .— 188 с.
3. B.V.Rauschenbach, M.Yu. Ovchinnikov, McKenna Lawlor S., Essential Spaceflight Dynamics and Magnetospherics, Kluwer & Microcosm Publ. 2003. - 416p.
4. В.В.Белецкий. Очерки о движении космических тел. М.: Наука, Изд.3, испр. и доп. 2009. 432 с..
5. Г.Н.Дубошин. Небесная механика. Основные задачи и методы. М.: Наука, 1968.
6. А.П.Маркеев. Точки либрации в небесной механике и космодинамике. М.: Наука, 1978. - 312 с. (Статья в Соросовском журнале <http://www.pereplet.ru/obrazovanie/stsoros/852.html>)
7. Д.Е.Охочимский, Ю.Г.Сихарулидзе. Основы механики космического полета. М.: Наука, 1990.
8. Н.М.Иванов, Л.Н.Лысенко. Баллистика и навигация космических аппаратов: Учебник для вузов – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Дрофа, 2004. – 544 с.
9. Р.Ф.Аппазов, О.Г.Сытин. Методы проектирования траекторий носителей и спутников Земли. М.: Наука, 1987.
10. Механика космического полета: М.С.Константинов, Е.Ф.Каменков, Б.П.Перельгин, В.К.Безвербый / Под редакцией В.П.Мишина. – М.: Машиностроение, 1989.

Дополнительная литература

1. Н.Н.Моисеев. Асимптотические методы нелинейной механики. М.: Наука, 1969.
2. R.H.Battin, An Introduction to the Mathematics and Methods of Astrodynamics, AIAA Inc. Publ. - 1999.
3. D.A.Vallado, Fundamentals of Astrodynamics and Applications, Second ed., Kluwer & Microcosm Publ. 2001. – 958 p.
4. J.R.Wertz, Spacecraft Attitude Determination and Control, Kluwer Academic Publ., Netherlands, 1980.
5. Препринты Института прикладной математики им.М.В.Келдыша РАН (<http://www.keldysh.ru/e-biblio/>), журналы Космические исследования, Acta Astronautica, Journal of Guidance, Control, and Dynamics.

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

Электронные ресурсы (<http://www.twirpx.com>), в том числе ИПМ им. М.В.Келдыша РАН (<http://keldysh.ru/>), базы данных по журналам: Космические исследования, Известия РАН: Теория и системы управления, Acta Astronautica, Advances in Space Research, Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, Journal of Guidance, Control and Dynamics.

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

MS Office, PowerPoint.

9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)

Успешное освоение курса «Динамика космического полёта» требует значительной самостоятельной работы студента. В программе курса приведено минимально необходимое время для работы студента над темой.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение и конспектирование рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала (по конспектам лекций, учебной и научной литературе);
- решение задач, предлагаемых студентам на лекциях;
- подготовку к контрольным, самостоятельным работам и тестам.

Руководство и контроль за самостоятельной работой студента осуществляется в результате анализа итогов контрольных, самостоятельных работ и тестов, а также индивидуальных консультаций.

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению: Техническая физика
профиль подготовки: Техническая физика космических летательных аппаратов
Физтех-школа Аэрокосмических Технологий
кафедра математического моделирования и прикладной математики
курс: 3
квалификация: бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 5 (осенний) - Дифференцированный зачет

Разработчик: М.Ю. Овчинников, д-р физ.-мат. наук, профессор

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач	УК-1.1 Анализирует задачу, выделяя этапы ее решения, действия по решению задачи
	УК-1.2 Находит, критически анализирует и выбирает информацию, необходимую для решения поставленной задачи
	УК-1.3 Рассматривает различные варианты решения задачи, оценивает их преимущества и недостатки
	УК-1.4 Грамотно, логично, аргументированно формирует собственные суждения и оценки
	УК-1.5 Определяет и оценивает практические последствия возможных вариантов решения задачи
ОПК-7 Способен самостоятельно осваивать современную физическую, аналитическую и технологическую аппаратуру различного назначения и работать на ней	ОПК-7.1 Понимает принципы работы используемой физической, аналитической и технологической аппаратуры
	ОПК-7.2 Владеет навыками безопасной работы с современной физической, аналитической и технологической аппаратурой
	ОПК-7.3 Проводит эксперимент с использованием физической, аналитической и технологической аппаратуры

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Динамика космического полёта» обучающийся должен:

знать:

Основные законы динамики космического полёта.

уметь:

Рассчитывать траектории космического аппарата в центральном поле, анализировать возмущенное движение центра масс космического аппарата.

владеть:

Методами теоретической механики и дифференциальных уравнений для составления уравнений движения космического аппарата.

3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

С целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия по теме прошлой лекции или в конце занятия по пройденной теме.

4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Перечень контрольных вопросов:

1. Невозмущенное движение (задача двух тел) Уравнения движения. Первые интегралы движения (интеграл энергии, интеграл площадей, интеграл Лапласа).
2. Связь между интегралами движения. Уравнение орбиты. Уравнение Кеплера. Законы Кеплера.
3. Геостационарный спутник. Большая полуось как мера энергии. Элементарные маневры. Эллипс Гомана. Первая космическая (круговая) скорость. Вторая космическая (параболическая) скорость.
4. Теория возмущенного движения Задача n-тел. Десять первых интегралов, плоскость Лапласа.

5. Задача трех тел. Лагранжевы и эйлеровы точки либрации, практическое использование точек либрации в космонавтике. Ограниченная задача трех тел.
6. Интеграл Якоби, поверхность нулевой относительной скорости, эволюция сечений поверхности нулевой скорости, межпланетные перелеты на примере миссий Земля-Луна.
7. Грависферы. Сфера притяжения, сфера действия. Использование грависфер при конструировании межпланетных траекторий.
8. Оскулирующие элементы. Уравнения движения в оскулирующих элементах. Уравнения возмущенного движения. Приближенные уравнения при малых возмущениях.
9. Уравнения в оскулирующих элементах как инструмент исследования возмущенного движения. Торможение спутника в атмосфере Земли. Проблемы спуска КА в атмосфере планет.
10. Влияние несферичности Земли на движение искусственного спутника. Гравитационное поле несферичной Земли. Возмущающее ускорение.
11. Эволюция орбиты спутника в поле полярно-сжатой Земли. Эволюция орбиты экваториального спутника, прецессия наклоненной орбиты,
12. Основы теории маневрирования КА. Характеристическая скорость. Маневры изменения плоскости орбиты. Оптимальное положение точки приложения импульса. Маневр в плоскости орбиты.
13. Коррекция межпланетных траекторий. Движение КА в окрестности планеты назначения. Картинная плоскость. Гелиоцентрический участок номинальной траектории КА. Эллипсоид влияния. Матрица маневра. Свойства коррекции.
14. Гравитационные маневры. Прицельная дальность. Использование гравитационно-го маневра при межпланетных перелетах. Изменение наклона плоскости гелио-центрической орбиты.
15. Моменты, действующие на КА и их использование для управления ориентацией. Движение КА в гравитационном поле. Положения равновесия.

Примерный перечень билетов:

Билет №1

1. Уравнение орбиты. Уравнение Кеплера. Законы Кеплера.
2. Основы теории маневрирования КА. Характеристическая скорость.

Билет №2

1. Невозмущенное движение (задача двух тел) Уравнения движения.
2. Движение КА в гравитационном поле. Положения равновесия.

Критерии оценивания

оценка «отлично (10)» выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины при ответе билета и ответе на вопросы по программе дисциплины, а также по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов;

оценка «отлично (9)» выставляется студенту, показавшему систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины при ответе билета и ответе на вопросы по программе дисциплины, а также по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов;

оценка «отлично (8)» выставляется студенту, показавшему систематизированные, знания учебной программы дисциплины при ответе билета и ответе на вопросы по программе дисциплины, а также по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов;

оценка «хорошо (7)» выставляется студенту по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов, если он твердо знает материал билета, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности;

оценка «хорошо (6)» выставляется студенту по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов, если он знает материал билета, по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе много неточностей;

оценка «хорошо (5)» выставляется студенту по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов, если он знает материал билета, излагает его, умеет применять полученные знания на практике, не допускает в ответе грубых ошибок;

оценка «удовлетворительно (4)» выставляется студенту по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов, а также, если во время ответа билета он показал фрагментарный, характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, но при этом он владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения;

оценка «удовлетворительно (3)» выставляется студенту по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов, а также, если во время ответа билета он показал разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушение логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации;

оценка «неудовлетворительно (2-1)» выставляется студенту по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов, а также, если во время ответа билета, он показал что не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных понятий дисциплины и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

При проведении устного дифференцированного зачета обучающемуся предоставляется 60 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету не должен превышать двух астрономических часов.

Во время проведения дифференцированного зачета при подготовке ответов на билеты обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины, конспектами лекций и любой другой литературой.

Во время проведения дифференцированного зачета при ответе обучающегося на вопросы по билету или по программе дисциплины, он не может пользоваться конспектами лекций и любой другой литературой.

3. Перечень контрольных заданий, используемых для оценки знаний, умений, навыков

Итоговая аттестация по дисциплине "Динамика космического полета" проводится в форме дифф. зачета.

Пример контрольных вопросов:

1. Невозмущенное движение (задача двух тел) Уравнения движения. Первые интегралы движения (интеграл энергии, интеграл площадей, интеграл Лапласа).
2. Связь между интегралами движения. Уравнение орбиты. Уравнение Кеплера. Законы Кеплера.
3. Геостационарный спутник. Большая полуось как мера энергии. Элементарные маневры. Эллипс Гомана. Первая космическая (круговая) скорость. Вторая космическая (параболическая) скорость.
4. Теория возмущенного движения Задача n-тел. Десять первых интегралов, плоскость Лапласа.
5. Задача трех тел. Лагранжевы и эйлеровы точки либрации, практическое использование точек либрации в космонавтике. Ограниченная задача трех тел.
6. Интеграл Якоби, поверхность нулевой относительной скорости, эволюция сечений поверхности нулевой скорости, межпланетные перелеты на примере миссий Земля-Луна.
7. Грависферы. Сфера притяжения, сфера действия. Использование грависфер при конструировании межпланетных траекторий.
8. Оскулирующие элементы. Уравнения движения в оскулирующих элементах. Уравнения возмущенного движения. Приближенные уравнения при малых возмущениях.
9. Уравнения в оскулирующих элементах как инструмент исследования возмущенного движения. Торможение спутника в атмосфере Земли. Проблемы спуска КА в атмосфере планет.
10. Влияние несферичности Земли на движение искусственного спутника. Гравитационное поле несферичной Земли. Возмущающее ускорение.

11. Эволюция орбиты спутника в поле полярно-сжатой Земли. Эволюция орбиты экваториального спутника, прецессия наклоненной орбиты,
12. Основы теории маневрирования КА. Характеристическая скорость. Маневры изменения плоскости орбиты. Оптимальное положение точки приложения импульса. Маневр в плоскости орбиты.
13. Коррекция межпланетных траекторий. Движение КА в окрестности планеты назначения. Картинная плоскость. Гелиоцентрический участок номинальной траектории КА. Эллипсоид влияния. Матрица маневра. Свойства коррекции.
14. Гравитационные маневры. Прицельная дальность. Использование гравитационного маневра при межпланетных перелетах. Изменение наклона плоскости гелиоцентрической орбиты.
15. Моменты, действующие на КА и их использование для управления ориентацией. Движение КА в гравитационном поле. Положения равновесия.

Пример билетов:

Билет 1

Невозмущенное движение (задача двух тел). Уравнения движения. Первые интегралы движения (вывод интегралов движения центра масс и интеграла энергии $V^2 = \left(\frac{2\mu}{r} + h \right)$). Характер движения в зависимости от h .

Билет 2

Невозмущенное движение (задача двух тел) Уравнения движения. Первые интегралы движения (вывод интегралов движения центра масс и интеграла площадей $\mathbf{r} \times \mathbf{V} = \mathbf{c}$). Секториальная скорость.

Билет 3

Невозмущенное движение (задача двух тел) Уравнения движения. Первые интегралы движения (вывод интеграла Лапласа $\mathbf{r} \frac{d\mathbf{r}'}{dt} - r' \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{c}$).

Билет 4

Три закона Кеплера. Вывод формулы, связывающей периоды обращения с большими полуосями орбит:

$$\left(\frac{T_1}{T_2} \right)^2 = \left(\frac{a_1}{a_2} \right)^3.$$

Билет 5

Качественный анализ свойств эллиптических орбит (эволюция орбиты в результате приложения мгновенного импульса, двухимпульсный переход, торможение спутника в атмосфере, затраты энергии на межпланетные перелеты) используя интеграл энергии $V^2 = \mu \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)$

Билет 6

Вывод формул для первой космической (круговой) скорости и второй космической (параболической) скорости). Понятие третьей (гиперболической) скорости.

Билет 6

Вывод уравнения Кеплера $E - e \sin E = M$ и его использование.

Билет 7

Невозмущенное движение (задача двух тел) Уравнения движения. Вывод формулы для орбиты на основе первых интегралов движения через выражение для r_f и тождество Лагранжа $(\mathbf{a} \times \mathbf{b})^2 = a^2 b^2 - (\mathbf{a} \mathbf{b})^2$.

Билет 8

Теория возмущенного движения. Задача n-тел (вывод десяти первых "классических" интегралов через функцию $U = k^2 S \frac{m_i m_j}{r_{ij}}$, плоскость Лапласа).

Билет 9

Планетная форма уравнений относительного движения (введение пертурбационной функции $R = \sum R_i$; $R_i = k^2 \sum_{j=1}^{n-1(i)} m_j \left(\frac{1}{r_{ij}} - \frac{x_i x_j + y_i y_j + z_i z_j}{r_j} \right)$).

Билет 10

Задача трех тел (схема вывода лагранжева случая относительного равновесия; ограничения на начальные условия движения).

Билет 11

Планетоидная ограниченная задача трех тел (вывод интеграла Якоби $(\dot{x})^2 + (\dot{y})^2 + (\dot{z})^2 = 2\Omega - C'$).

Билет 12

Планетоидная ограниченная задача трех тел (интеграл Якоби $(\dot{x})^2 + (\dot{y})^2 + (\dot{z})^2 = 2\Omega - C'$). Формула поверхности нулевой относительной скорости.

Билет 13

Планетоидная ограниченная задача трех тел (интеграл Якоби $(\dot{x})^2 + (\dot{y})^2 + (\dot{z})^2 = 2\Omega - C'$). Эволюция сечений поверхности нулевой скорости при изменении константы интеграла Якоби.

Билет 14

Грависферы (Вывод формулы для сферы притяжения).

Билет 14

Грависферы (Схема вывода формулы для сферы действия (грависферы Лапласа)).

Билет 15

Уравнения движения в оскулирующих элементах. Введение сферических координат и оскулирующих элементов. Определение *основной операции*.

Билет 16

Уравнения движения в оскулирующих элементах. Введение сферических координат и оскулирующих элементов. Вывод уравнения для наклона орбиты $\frac{di}{dt} = \frac{r}{\sqrt{\mu p}} \cos u W$.

Билет 17

Уравнения движения в оскулирующих элементах. Введение сферических координат и оскулирующих элементов. Вывод уравнения для долготы восходящего узла $\frac{d\Omega}{dt} = \frac{r}{\sqrt{\mu p}} \frac{\sin u}{\sin i} W$

Билет 18

Уравнения движения в оскулирующих элементах. Введение сферических координат и оскулирующих элементов. Вывод уравнения для параметра орбиты $\frac{dp}{dt} = 2\sqrt{\frac{p}{\mu}}rT$.

Билет 19

Торможение спутника в атмосфере Земли. Введение силы лобового сопротивления атмосферы. Качественное исследование влияния сопротивления на эволюцию i , Ω и p , используя формулы $\frac{di}{du} = \frac{r^3}{\mu p} \cos u W$,

$$\frac{d\Omega}{du} = \frac{r^3}{\mu p} \frac{\sin u}{\sin i} W \text{ и } \frac{dp}{du} = \frac{2r^3}{\mu} T.$$

Билет 20

Торможение спутника в атмосфере Земли. Введение силы лобового сопротивления атмосферы. Качественное исследование влияния сопротивления на эволюцию эксцентриситета орбиты e с использованием формул

$$\frac{de}{du} = \frac{r^2}{\mu} \left[S \sin v + \left(1 + \frac{r}{p} \right) T \cos v + \frac{er}{p} T \right].$$

Билет 21

Влияние несферичности Земли на движение искусственного спутника. Гравитационное поле несферичной Земли. Вывод компонент возмущающего ускорения для сжатия Земли через выражение для потенциала

$$U = \frac{\mu}{r} - \frac{\varepsilon}{3r^3} (\sin^2 \psi - 1).$$

Билет 22

Влияние несферичности Земли на движение искусственного спутника. Эволюция орбиты экваториального спутника в поле несферичной Земли, используя формулы $\frac{di}{du} = \frac{r^3}{\mu p} \cos u W$, $\frac{d\Omega}{du} = \frac{r^3}{\mu p} \frac{\sin u}{\sin i} W$,

$$\frac{dp}{du} = \frac{2r^3}{\mu} T, \quad \frac{de}{du} = \frac{r^2}{\mu} \left[S \sin v + \left(1 + \frac{r}{p} \right) T \cos v + \frac{er}{p} T \right],$$

$$\frac{d\omega}{du} = \frac{r^2}{e\mu} \left[-S \cos v + \left(1 + \frac{r}{p} \right) T \sin v - \frac{er}{p} W \sin u \cot i \right] \text{ и выражения для компонент ускорений}$$

$$S = \frac{\varepsilon}{r^4} (3 \sin^2 u \sin^2 i - 1), T = -\frac{\varepsilon}{r^4} \sin 2u \sin^2 i, W = -\frac{\varepsilon}{r^4} \sin 2i \sin u$$

Билет 23

Влияние несферичности Земли на движение искусственного спутника. Прецессия орбиты в поле несферичной Земли, используя формулы $\frac{di}{du} = \frac{r^3}{\mu p} \cos u W$, $\frac{d\Omega}{du} = \frac{r^3}{\mu p} \frac{\sin u}{\sin i} W$, $\frac{dp}{du} = \frac{2r^3}{\mu} T$,

$$\frac{de}{du} = \frac{r^2}{\mu} \left[S \sin v + \left(1 + \frac{r}{p} \right) T \cos v + \frac{er}{p} T \right],$$

$$\frac{d\omega}{du} = \frac{r^2}{e\mu} \left[-S \cos v + \left(1 + \frac{r}{p} \right) T \sin v - \frac{er}{p} W \sin u \cot i \right] \text{ и выражения для компонент ускорений}$$

$$S = \frac{\varepsilon}{r^4} (3 \sin^2 u \sin^2 i - 1), T = -\frac{\varepsilon}{r^4} \sin 2u \sin^2 i, W = -\frac{\varepsilon}{r^4} \sin 2i \sin u.$$

Связь с теорией гироскопа, практическое использование эволюции орбиты.

Билет 24

Движение КА при наличии двух притягивающих центров. Вывод выражения для возмущающего ускорения. Интерпретация эволюции формы орбиты на основе формулы для изменения эксцентриситета орбиты e :

$$\Delta e = -15\pi \frac{m_1}{m_2} \left(\frac{a}{R} \right)^3 e \sqrt{1-e^2} \cos \alpha \sin \alpha$$

Билет 25

Основы теории маневрирования КА. Понятие характеристической скорости. Матрица маневра. Маневр изменения плоскости орбиты. Оптимальное положение точки приложения импульса. Использовать формулы

$$\frac{d\Omega}{du} = \frac{r^3}{\mu p \sin i} W, \quad \frac{di}{du} = \frac{r^3}{\mu p} \cos u W$$

Билет 26

Основы теории маневрирования КА. Понятие характеристической скорости. Маневр изменения периода

обращения спутника вокруг Земли. Использовать выражение $T_{rev} = 2\pi \frac{a^{3/2}}{\sqrt{\mu}}$

Билет 27

Коррекция межпланетных траекторий. Движение КА в окрестности планеты назначения. Картичная плоскость. Эллипсоид влияния. Понятие матрицы маневра.

Билет 28

Коррекция межпланетных траекторий. Свойства коррекции. "Нуль-направление" на сфере единичных корректирующих импульсов. Плоскость оптимальной коррекции. Двухпараметрическая коррекция. Об оптимальном положении точки коррекции на траектории.

Билет 29

Коррекция межпланетных траекторий. Вырождение матрицы маневра. Вырождение матрицы маневра на примере движения точки в центральном поле.

Билет 30

Гравитационные маневры. Прицельная дальность. Использование гравитационного маневра при межпланетных перелетах.

Билет 31

Относительное движение двух близких КА. Задача Хилла. Вывод линеаризованных уравнений относительного движения КА в орбитальной системе координат, начало которой помещено в центр масс одного из КА.

Билет 32

Вывод выражения для гравитационного момента, действующего на спутник-гантелю, состоящего из двух идентичных материальных точек, соединенных невесомым стержнем, при движении спутника в плоскости орбиты. Уравнение движения относительно орбитальной системы координат.

Билет 33

Анализ уравнения вращательного движения спутника-гантели в плоскости орбиты радиуса R относительно орбитальной системы координат, состоящего из двух идентичных материальных точек массы m , соединенных невесомым стержнем длины $2l$ (положения равновесия, их устойчивость). Использовать выражение для гравитационного момента $M_{gr} = -6\mu ml^2 \sin \alpha \cos \alpha / R^3$, где μ - гравитационный параметр Земли, α - угол между местной вертикалью и стержнем.

Билет 34

Вывод уравнения движения спутника с постоянным магнитом в поле прямого диполя с дипольным моментом μ_m в плоскости круговой полярной орбиты радиуса R . Принять выражения для проекций вектора местной магнитной индукции на оси орбитальной системы координат (по касательной к орбите, по нормали в ее плоскости и по местной вертикали соответственно) в виде

$B_1 = B_0 \sin i \cos u, B_2 = B_0 \cos i, B_3 = -2B_0 \sin i \sin u$, где i - наклонение орбиты, u - аргумент широты, $B_0 = \mu_m / R^3$.

4. Критерии оценивания

оценка «отлично (10)» выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины при ответе экзаменационного билета и ответе на вопросы по программе дисциплины, а также по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов;

оценка «отлично (9)» выставляется студенту, показавшему систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины при ответе экзаменационного билета и ответе на вопросы по программе дисциплины, а также по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов;

оценка «отлично (8)» выставляется студенту, показавшему систематизированные, знания учебной программы дисциплины при ответе экзаменационного билета и ответе на вопросы по программе дисциплины, а также по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов;

оценка «хорошо (7)» выставляется студенту по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов, если он твердо знает материал экзаменационного билета, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности;

оценка «хорошо (6)» выставляется студенту по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов, если он знает материал экзаменационного билета, по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе много неточностей;

оценка «хорошо (5)» выставляется студенту по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов, если он знает материал экзаменационного билета, излагает его, умеет применять полученные знания на практике, не допускает в ответе грубых ошибок;

оценка «удовлетворительно (4)» выставляется студенту по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов, а также, если во время ответа экзаменационного билета он показал фрагментарный, характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, но при этом он владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения;

оценка «удовлетворительно (3)» выставляется студенту по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов, а также, если во время ответа экзаменационного билета он показал разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушение логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации;

оценка «неудовлетворительно (2-1)» выставляется студенту по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов, а также, если во время ответа экзаменационного билета, он показал что не знает большей части основного содержания учебной про-

граммы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных понятий дисциплины и не умеет использовать полученные знания при решении типовых практических задач.

5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

Порядок проведения устного дифф. зачета:

При проведении устного дифф. зачета обучающемуся предоставляется 60 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету на устном дифф. зачете не должен превышать двух астрономических часов.

Во время проведения дифф. зачета при подготовке ответов на билеты обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины, конспектами лекций, семинаров и любой другой литературой.

Во время проведения дифф. зачета, при ответе обучающегося на вопросы по билету или по программе дисциплины, он не может пользоваться конспектами лекций и семинаров и любой другой литературой.