

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ ИМ. М.В. КЕЛДЫША
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»**

Утверждена
Ученым советом
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН,
протокол № 14-22 от «10» ноября 2022 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ:
«Элементы небесной механики»

Научная специальность:
1.1.7 – «Теоретическая механика, динамика машин»

Форма обучения
очная

Москва, 2022

Научная специальность:

1.1.7 – «Теоретическая механика, динамика машин»

Дисциплина: «Элементы небесной механики»

Форма обучения: очная

ИСПОЛНИТЕЛЬ (разработчик программ):

Тучин А.Г., ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, г.н.с., д.ф.-м.н.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА РЕКОМЕНДОВАНА

Ученым советом ИПМ им. М.В. Келдыша РАН,

протокол № 14/22 от «10» ноября 2022 г.

Заведующий аспирантурой _____ / Меньшов И.С. /

Оглавление

АННОТАЦИЯ	4
1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ	4
2. ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ	4
3. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ.....	5
3.1. Структура дисциплины	5
3.2. Содержание разделов дисциплины	6
3.3. Лекционные занятия	7
3.4. Семинарские занятия.....	7
4. ТЕКУЩАЯ, ПРОМЕЖУТОЧНАЯ И ИТОГОВАЯ АТТЕСТАЦИЯ. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ.....	8
5. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	10
6. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	11

АННОТАЦИЯ

Рабочая программа дисциплины «Элементы небесной механики» разработана и составлена на основании ФГТ - «Федеральные государственные требования к структуре программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре), условиям их реализации, срокам освоения этих программ с учетом различных форм обучения, образовательных технологий и особенностей отдельных категорий аспирантов (адъюнктов)» (Приказ Минобрнауки № 951 от 20.10.2021г.), в соответствии с учебными планами подготовки аспирантов ФГУ «Федеральный исследовательский центр «Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН) по научным специальностям: 1.1.7 - «Теоретическая механика, динамика машин».

Дисциплина «Элементы небесной механики» реализуется в рамках Блока «Образовательный компонент» программы подготовки научных и научно - педагогических кадров в аспирантуре ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

Основным источником материалов для формирования содержания программы являются: учебные издания, монографии, научные публикации, Интернет-ресурсы.

Общая трудоёмкость дисциплины по учебному плану составляет 2 ЗЕТ (72 часа), из них лекций – 4 часа, семинарских занятий – 10 часов, практических занятий – 0 часов, самостоятельной работы – 22 часа, контроль – 36 часов. Дисциплина реализуется на 2-м курсе, в 3-м семестре, продолжительность обучения – 1 семестр.

Текущая и промежуточная аттестация проводится не менее двух раз в соответствии с заданиями и формами контроля, предусмотренными настоящей программой.

Итоговая оценка знания осуществляется в период зачётно-экзаменационной сессии в форме экзамена.

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Цели освоения учебной дисциплины «Элементы небесной механики»:

- освоение теоретического материала дисциплины: определения, теоремы и их доказательства;
- формирование профессиональных компетенций, связанных с использованием методов и алгоритмов, изученных в рамках дисциплины, для решения прикладных задач.

Задачи освоения учебной дисциплины «Элементы небесной механики»:

- изучение задачи двух, трёх тел и n тел;
- овладение методами расчёта манёвров космических аппаратов;
- овладение методами определения орбит.

2. ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Процесс изучения дисциплины «Элементы небесной механики» направлен на получение профессиональных знаний, умений и формирование определенных компетенций или отдельных их элементов:

- а) универсальные (УК):** не предусмотрено

б) общепрофессиональные (ОПК): не предусмотрено.

в) профессиональные (ПК):

- способность использовать основные понятия прикладной небесной механики (ПК-3).

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

Иметь представление:

- об основных подходах к изучению задач небесной механики;

Знать:

- основные типы невозмущённого кеплеровского движения;
- формы представления гравитационного потенциала;
- специфику использования общей теории относительности (ОТО) в задачах небесной механики;

Уметь:

- использовать методы определения орбит;
- совершать переход от прямоугольных координат материальной точки на кеплеровой орбите к орбитальным элементам;

Владеть:

- методом картинной плоскости для решения краевых задач межпланетных перелётов;
- методами анализа задачи трёх тел;

Приобрести опыт:

- проектирования манёвров космических аппаратов.

3. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

3.1. Структура дисциплины

Распределение трудоёмкости дисциплины по видам учебных работ

Вид учебной работы	Трудоёмкость	
	ЗЕТ	час.
Общая трудоёмкость по учебному плану	2	72
Лекции (Л)		4
Практические занятия (ПЗ)		0
Семинары (С)		10
Самоподготовка (проработка и повторение лекционного материала и материала учебников и учебных пособий, подготовка к семинарским и практическим занятиям) и самостоятельное изучение тем дисциплины		22
Контроль		36
<i>Вид контроля: экзамен</i>		

3.2. Содержание разделов дисциплины

Общее содержание дисциплины

№ раздела	Наименование темы (раздела)	Содержание темы (раздела)	Форма текущей аттестации
1.	Задача двух тел	Невозмущённое кеплеровское движение. Первые интегралы дифференциальных уравнений невозмущённого кеплеровского движения. Основные типы невозмущённого кеплеровского движения. Орбитальные элементы. Дифференциальные уравнения возмущённого движения в оскулирующих элементах. Разложение координат невозмущённого кеплеровского движения в ряды по степеням времени.	О, ДЗ
2.	Определение орбит, гравитационный потенциал, движение вокруг центра масс	Определение орбиты спутника в модели невозмущённого кеплеровского движения по двум положениям и времени. Задача Ламберта. Задача Ламберта в форме Бэттина. Определение орбиты КА по трём наблюдениям прямого восхождения и склонения. Метод Лапласа и метод Гаусса. Метод Гиббса. Разложение гравитационного потенциала в ряд по сферическим функциям. Задача о движении небесного тела вокруг его центра масс под действием момента гравитационных сил. Уравнения движения спутника относительно центра масс под действием гравитационного момента на круговой орбите. Стационарные движения спутника в орбитальной системе координат: положения равновесия спутника с неравными главными центральными моментами инерции, стационарные вращения осесимметричного спутника (коническая, цилиндрическая и гиперболоидальная прецессии). Устойчивость стационарных движений. Возмущенное движение спутника в окрестности устойчивого положения равновесия в орбитальной системе координат. Трехосная и одноосная гравитационная ориентация спутника.	О, ДЗ
3.	Задача трёх тел	Задача n тел. Инерциальная, относительная и барицентрическая формы уравнений движения. Первые интегралы уравнений движения. Общий случай ограниченной задачи трёх тел. Переменные Нехвила. Гомографические лагранжевы частные решения. Ограниченная круговая задача трёх тел. Интеграл Якоби. Критерий Тиссерана. Поверхность нулевой относительной скорости в ограниченной задаче трёх тел. Лагранжевы решения: точки либрации. Устойчивость точек либрации. Основные уравнения задачи Хилла. Метод Ляпунова решения задачи Хилла. Регулярные и хаотические орбиты. Сечение Пуанкаре. Показатели Ляпунова.	О, ДЗ
4.	Манёвры космического аппарата	Импульсные манёвры и манёвры с ограниченной тягой двигателя. Удельная тяга. Характеристическая скорость и составляющие её потерь. Перелёты в центральном поле между компланарными круговыми орбитами. Траектория гомановского перелёта. Трёхимпульсный биэллиптический перелёт. Поворот плоскости круговой орбиты в центральном поле. Перелёт между некомпланарными круговыми орбитами. Схемы маневрирования с использованием двух и трёх импульсов. Картиная плоскость и её использование при решении краевых задач межпланетных перелётов. Гравитационные манёвры.	О, ДЗ

5.	ОТО в небесной механике	Закон тяготения в теории относительности. Искривление световых лучей в окрестности Солнца. Дифференциальные уравнения движения, соответствующего квадратичной форме Шварцшильда.	О, ДЗ
----	-------------------------	--	-------

Примечание: О – опрос, Д – дискуссия (диспут, круглый стол, мозговой штурм, ролевая игра), ДЗ – домашнее задание (эссе и пр.). Формы контроля не являются жёсткими и могут быть заменены преподавателем на другую форму контроля.

3.3. Лекционные занятия

№ занятия	№ раздела (темы)	Краткое содержание раздела (темы)	Кол-во часов
1.	1	Невозмущённое кеплеровское движение. Первые интегралы дифференциальных уравнений невозмущённого кеплеровского движения. Основные типы невозмущённого кеплеровского движения. Орбитальные элементы. Дифференциальные уравнения возмущённого движения в оскулирующих элементах. Разложение координат невозмущённого кеплеровского движения в ряды по степеням времени.	2
2.	2	Определение орбиты спутника в модели невозмущённого кеплеровского движения по двум положениям и времени. Задача Ламберта. Задача Ламберта в форме Бэттина. Определение орбиты КА по трём наблюдениям прямого восхождения и склонения. Метод Лапласа и метод Гаусса. Метод Гиббса.	2
	ВСЕГО		4

3.4. Семинарские занятия

№ занятия	№ Раздела (темы)	Краткое содержание раздела (темы)	Кол-во часов
1.	2	Разложение гравитационного потенциала в ряд по сферическим функциям. Задача о движении небесного тела вокруг его центра масс под действием момента гравитационных сил. Уравнения движения спутника относительно центра масс под действием гравитационного момента на круговой орбите. Стационарные движения спутника в орбитальной системе координат: положения равновесия спутника с неравными главными центральными моментами инерции, стационарные вращения осесимметричного спутника (коническая, цилиндрическая и гиперболоидальная прецессии). Устойчивость стационарных движений. Возмущенное движение спутника в окрестности устойчивого положения равновесия в орбитальной системе координат. Трехосная и одноосная гравитационная ориентация спутника.	2
2.	3	Задача n тел. Инерциальная, относительная и барицентрическая формы уравнений движения. Первые интегралы уравнений движения. Общий случай ограниченной задачи трёх тел. Переменные Нехвила. Гомографические лагранжевы частные решения. Ограниченная круговая задача трёх тел. Интеграл Якоби. Критерий Тиссерана. Поверхность нулевой относительной скорости в ограниченной задаче трёх тел. Лагранжевы решения: точки либрации. Устойчивость точек либрации. Основные уравнения задачи Хилла. Метод Ляпунова решения задачи Хилла. Регулярные и хаотические орбиты. Сечение Пуанкаре. Показатели Ляпунова.	2
3.	4	Импульсные манёвры и манёвры с ограниченной тягой двигателя. Удельная тяга. Характеристическая скорость и составляющие её потерь. Перелёты в центральном поле между компланарными круговыми орбитами. Траектория гомановского перелёта. Трёхимпульсный биэллиптический перелёт.	2
4.	4	Поворот плоскости круговой орбиты в центральном поле. Перелёт между некомпланарными круговыми орбитами. Схемы маневрирования с использованием двух и трёх импульсов. Картинная плоскость и её использование при решении краевых задач межпланетных перелётов.	2

5.	5	Закон тяготения в теории относительности. Искривление световых лучей в окрестности Солнца. Дифференциальные уравнения движения, соответствующего квадратичной форме Шварцшильда.	2
	ВСЕГО		10

4. ТЕКУЩАЯ, ПРОМЕЖУТОЧНАЯ И ИТОГОВАЯ АТТЕСТАЦИЯ. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

Текущая и промежуточная аттестация аспирантов. Текущая аттестация аспирантов проводится в соответствии с локальным актом ИПМ им. М.В. Келдыша РАН – Положением о текущей, промежуточной и итоговой аттестации аспирантов ИПМ им. М.В. Келдыша РАН по программам высшего образования – программам подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре и является обязательной.

Текущая аттестация по дисциплине проводится в форме опроса, а также оценки вопроса-ответа в рамках участия обучающихся в дискуссиях и различных контрольных мероприятиях по оцениванию фактических результатов обучения, осуществляемых преподавателем, ведущим дисциплину. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины см. ниже.

Объектами оценивания выступают:

- учебная дисциплина: активность на занятиях, своевременность выполнения различных видов заданий, посещаемость занятий;
- степень усвоения теоретических знаний и уровень овладения практическими умениями и навыками по всем видам учебной работы, проводимым в рамках семинаров, практических занятий и самостоятельной работы.

Оценивание обучающегося на занятиях осуществляется с использованием нормативных оценок по четырёхбалльной системе (5 – отлично, 4 – хорошо, 3 – удовлетворительно, 2 – неудовлетворительно).

Оценочные средства для текущей и промежуточной аттестации

Форма контроля знаний	Вид аттестации	Примечание
Опрос слушателей	текущая	Опрос по темам предыдущих занятий
Домашние задания	промежуточная	Подготовка рефератов

Список рефератов для промежуточной аттестации:

1. Невозмущённое кеплеровское движение.
2. Первые интегралы дифференциальных уравнений невозмущённого кеплеровского движения.
3. Основные типы невозмущённого кеплеровского движения.
4. Орбитальные элементы.
5. Дифференциальные уравнения возмущённого движения в оскулирующих элементах.
6. Разложение координат невозмущённого кеплеровского движения в ряды по степеням времени.

7. Определение орбиты спутника в модели невозмущённого кеплеровского движения по двум положениям и времени.
8. Задача Ламберта.
9. Задача Ламберта в форме Бэттина.
10. Определение орбиты КА по трём наблюдениям прямого восхождения и склонения.
11. Метод Лапласа и метод Гаусса.
12. Метод Гиббса.

Итоговая аттестация аспирантов. Итоговая аттестация аспирантов по дисциплине проводится в соответствии с локальным актом ИПМ им. М.В. Келдыша РАН – Положением о текущей, промежуточной и итоговой аттестации аспирантов ИПМ им. М.В. Келдыша РАН по программам высшего образования – программам подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре и является обязательной.

Итоговая аттестация по дисциплине осуществляется в форме экзамена в период зачётно-экзаменационной сессии в соответствии с графиком учебного процесса по приказу (распоряжению заместителю директора по научной работе). Обучающийся допускается к экзамену в случае выполнения аспирантом всех учебных заданий и мероприятий, предусмотренных настоящей программой. В случае наличия учебной задолженности (пропущенных занятий и (или) невыполненных заданий) аспирант отрабатывает пропущенные занятия и выполняет задания.

Оценивание обучающегося на итоговой аттестации осуществляется с использованием нормативных оценок на экзамене по четырёхбалльной системе (5 – отлично, 4 – хорошо, 3 – удовлетворительно, 2 – неудовлетворительно).

Оценивание аспиранта на итоговой аттестации в форме экзамена

Оценка	Требования к знаниям и критерии выставления оценок
2 – неудовлетворительно	<ul style="list-style-type: none"> – Пробелы в знаниях или отсутствие знаний по значительной части основного учебного материала; – основные задания, предусмотренные программой, не выполнялись самостоятельно; – допущены существенные ошибки при ответе.
3 – удовлетворительно	<ul style="list-style-type: none"> – Владение основным объёмом знаний по дисциплине; – затруднения в самостоятельных ответах; – оперирование неточными формулировками; – в процессе ответов допускаются ошибки по существу вопросов; – способность решать лишь наиболее лёгкие задачи.
4 – хорошо	<ul style="list-style-type: none"> – Владение знаниями дисциплины почти в полном объёме программы (имеются пробелы знаний только в некоторых, особенно сложных разделах); – самостоятельно и отчасти при наводящих вопросах даются полноценные ответы на вопросы билета; – умеет решать лёгкие задачи и задачи средней тяжести.
5 – отлично	<ul style="list-style-type: none"> – Всестороннее, систематическое и глубокое знание учебного программного материала; – самостоятельное выполнение всех предусмотренных программой заданий, – глубокое освоение основной и дополнительной литературы,

	рекомендованной программой, – проявление творческих способностей и научного подхода в понимании и изложении учебного программного материала.
--	---

Ниже приведён примерный список вопросов для экзамена.

1. Невозмущённое кеплеровское движение. Первые интегралы дифференциальных уравнений невозмущённого кеплеровского движения.
2. Основные типы невозмущённого кеплеровского движения. Орбитальные элементы.
3. Дифференциальные уравнения возмущённого движения в оскулирующих элементах.
4. Разложение координат невозмущённого кеплеровского движения в ряды по степеням времени.
5. Определение орбиты спутника в модели невозмущённого кеплеровского движения по двум положениям и времени. Задача Ламберта. Задача Ламберта в форме Бэттина.
6. Определение орбиты КА по трём наблюдениям прямого восхождения и склонения. Метод Лапласа и метод Гаусса. Метод Гиббса.
7. Разложение гравитационного потенциала в ряд по сферическим функциям.
8. Задача о движении небесного тела вокруг его центра масс под действием момента гравитационных сил.
9. Задача n тел. Инерциальная, относительная и барицентрическая формы уравнений движения. Первые интегралы уравнений движения.
10. Общий случай ограниченной задачи трёх тел. Переменные Нехвила. Гомографические лагранжевы частные решения.
11. Ограниченная круговая задача трёх тел. Интеграл Якоби. Критерий Тиссерана.
12. Поверхность нулевой относительной скорости в ограниченной задаче трёх тел. Лагранжевы решения: точки либрации. Устойчивость точек либрации.
13. Основные уравнения задачи Хилла. Метод Ляпунова решения задачи Хилла.
14. Регулярные и хаотические орбиты. Сечение Пуанкаре. Показатели Ляпунова.
15. Импульсные манёвры и манёвры с ограниченной тягой двигателя. Удельная тяга. Характеристическая скорость и составляющие её потерь.
16. Перелёты в центральном поле между компланарными круговыми орбитами. Траектория гомановского перелёта. Трёхимпульсный биэллиптический перелёт.
17. Поворот плоскости круговой орбиты в центральном поле.
18. Перелёт между некомпланарными круговыми орбитами. Схемы маневрирования с использованием двух и трёх импульсов.
19. Картинная плоскость и её использование при решении краевых задач межпланетных перелётов.
20. Закон тяготения в теории относительности. Искривление световых лучей в окрестности Солнца.
21. Дифференциальные уравнения движения, соответствующего квадратичной форме Шварцшильда.

5. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Основная литература

1. Абалакин В.К., Аксёнов Е.П., Гребеников Е.А. и др. Справочное руководство по небесной механике и астродинамике / Под ред. Г.Н. Дубошина. – М.: Наука, 1976. – 864 с.
2. Белецкий В.В. Движение искусственного спутника относительно центра масс. – М.: Наука, 1965. – 416 с.
3. Бэттин Р. Наведение в космосе. – М.: Машиностроение, 1966. – 450 с.
4. Дубошин Г.Н. Небесная механика. Аналитические и качественные методы. – М.: Наука, 1978. – 456 с.

5. Дубошин Г.Н. Небесная механика. Основные задачи и методы. – М.: Наука, 1968. – 800 с.
6. Мюррей К., Дермотт С. Динамика Солнечной системы. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 588 с.
7. Охоцимский Д.Е., Сихарулидзе Ю.Г. Основы механики космического полёта. – М.: Наука, 1990. – 448 с.
8. Рой А.Э. Движение по орбитам. – М.: Мир, 1981. – 544 с.
9. Херрик С. Астродинамика. – М.: Мир. Т.1 – 1976. – 320 с.; Т.2 – 1977. – 264 с.; Т.3 – 1978. – 360 с.

Дополнительная литература и Интернет-ресурсы

1. Брумберг В.А. Релятивистская небесная механика. – М.: Наука, 1972. – 392 с.
2. Маркеев А.П. Точки либрации в небесной механике и космодинамике. – М.: Наука, 1978. – 312 с.
3. Маршал К. Задача трех тел. – М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2005. – 640 с.
4. Морбиделли А. Современная небесная механика. Аспекты динамики Солнечной системы. – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2014. – 413 с.
5. Себехей В. Теория орбит: ограниченная задача трех тел. – М.: Наука, 1982. – 656 с.
6. Холшевников К.В., Питьев Н.П., Титов В.Б. Притяжение небесных тел. – СПб, 2005. – 108 с. – URL: <http://www.astro.spbu.ru/sites/default/files/Gravitation.pdf>
7. Холшевников К.В., Титов В.Б. Задача двух тел. – СПб, 2007. – 180 с. – URL: <http://www.astro.spbu.ru/sites/default/files/TwoBody.pdf>
8. Шази Ж. Теория относительности и небесная механика. – Ижевск: Институт компьютерных исследований. Т.1 – 2011. – 266 с.; Т.2 – 2012. – 268 с.
9. Battin R.H. An Introduction to the Mathematics and Methods of Astrodynamics. – AIAA Education Series, 1999. – XXXII p. + 800 p.

6. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Для чтения лекций и проведения семинаров требуется мультимедийная аудитория с проектором. Желательно наличие интерактивной доски.

ИСПОЛНИТЕЛИ (разработчики программы):

Тучин А.Г., ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, зав. сектором № 2 отдела № 5, д.ф.-м.н.