

**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова**

**ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА НЕБЕСНОЙ МЕХАНИКИ, АСТРОМЕТРИИ И ГРАВИМЕТРИИ**

УТВЕРЖДАЮ

**«__» _____ / /
20 г.**

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Наименование дисциплины:

НЕБЕСНАЯ МЕХАНИКА

**Уровень высшего образования:
Специалитет**

Специальность:

03.05.01 Астрономия

Направленность (профиль)/специализация образовательной программы:

Общая специальность

Форма обучения:

Очная

Москва 20__

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по специальности 03.05.01 «Астрономия», утвержденным приказом МГУ от 30.12.2020 г. № 1381.

Год (годы) приема на обучение_____

:

Авторы–составители:

1. К.ф.-м.н. доцент Ширмин Геннадий Иванович, кафедра небесной механики, астрометрии и гравиметрии

Заведующий кафедрой небесной механики, астрометрии и гравиметрии
Д.ф.-м.н. профессор Жаров Владимир Евгеньевич

Аннотация к рабочей программе дисциплины

Курс является одним из базовых общеобразовательных лекционных курсов по специальности “астрономия”. В нем излагаются принципы динамического моделирования движений небесных тел и их систем, а также аналитические и качественные методы классической небесной механики с приложениями к задачам теоретической астрономии. В курсе дается также краткое введение в астродинамику - теорию движения космических аппаратов и искусственных спутников тел Солнечной системы. Данный курс лекций служит цели ознакомления слушателей с теорией движения небесных тел как основой современных средств (и методов) высокоточного прогнозирования движений естественных и искусственных космических объектов на основе астрономических наблюдений.

Курс делится на шесть частей.

Первая часть курса посвящена основаниям небесной механики – трем законам механики и закону всемирного тяготения Ньютона.

Во второй части рассматриваются задача двух тел как основа теории невозмущенного движения небесных тел.

Третья часть курса посвящена возмущенному движению в рамках задачи ”N” тел.

Четвертая часть курса посвящена вопросам интегрирования уравнений возмущенного движения и структуре их решения, а также классификации возмущений в элементах орбит небесных тел.

Основы теории задачи трех тел излагаются в пятой части курса.

В шестой части курса дается краткое введение в астродинамику как теорию движения искусственных спутников тел Солнечной системы и межпланетных космических аппаратов.

Дисциплина реализуется на 3 курсе в 5 и 6 семестрах и является обязательной для освоения обучающимися.

Объем дисциплины составляет 5 з.е., в том числе 104 академических часа, отведенных на контактную работу обучающихся с преподавателем, 76 академических часов, отведенных на самостоятельную работу обучающихся.

Промежуточная аттестация по дисциплине (модулю) – зачет в 5 семестре, экзамен в 6 семестре.

1. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы

Дисциплина «Небесная механика» относится к базовой части и является обязательной для освоения на астрономическом отделении.

2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия

Отсутствуют

3. Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с требуемыми компетенциями выпускников

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора (индикаторов) достижения компетенции	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с индикаторами достижения компетенций
		<p>Знать: базовые астрономические и физико-математические теории и их взаимосвязь; знать математический аппарат теоретической астрономии и небесной механики; основные математические методы, используемые при решении задач небесной механики</p> <p>Уметь: применять базовые астрономические и физико-математические теории в научных исследованиях; решать типовые задачи небесной механики.</p> <p>Владеть/Иметь опыт: математическим аппаратом, применяемым в небесной механике; методами теоретического исследования явлений и процессов в небесной механике.</p>

4. Объем дисциплины (модуля) составляет 5 з.е., в том числе: 104 академических часа, отведенных на контактную работу обучающихся с преподавателем, 76 академических часов, отведенных на самостоятельную работу обучающихся.

Контактная работа включает в себя:

занятия лекционного типа (лекции и иные учебные занятия, предусматривающие преимущественную передачу учебной информации педагогическими работниками организации и (или) лицами, привлекаемыми организацией к реализации образовательных программ на иных условиях, обучающимся), и (или) занятия

семинарского типа (семинары, практические занятия, практикумы, лабораторные работы, коллоквиумы и иные аналогичные занятия), и (или) групповые консультации, и (или) индивидуальную работу обучающихся с педагогическими работниками организации и (или) лицами, привлекаемыми организацией к реализации образовательных программ на иных условиях (в том числе индивидуальные консультации);...

В конце данного пункта следует отметить, если дисциплина или часть ее реализуется с применением электронного обучения и дистанционных образовательных технологий)

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

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля), Форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	Всего (ак.ч.)	В том числе					Форма текущего контроля успеваемости, наименование	
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) <i>Виды контактной работы, академические часы¹</i>				Всего		
		Занятия лекционного типа (лекции)	Занятия семинарского типа					
			Семинары	Лабораторные занятия*	Практические занятия*			
Тема 1 . Предмет методы и физические основы теоретической астрономии и небесной механики	20	10				10		
Тема 2. Невозмущенное движение небесных тел . Дифференциальные уравнения и интегралы движения.	23	13				10		

¹Текущий контроль успеваемости может быть реализован в рамках занятий лекционного и(или) семинарского типа.

Тема 3. Возмущенное движение небесных тел. Задача "N" тел: дифференциальные уравнения и интегралы движения.	25	13					12	Контрольная работа
Промежуточная аттестация: зачет (указывается форма проведения)	4						4	
Тема 4. Интегрирование дифференциальных уравнений возмущенного движения. Структура возмущений в орбитальных элементах	51	17	17				17	
Тема 5. Задача трёх тел в классической небесной механике.	51	17	17				17	Контрольная работа
Промежуточная аттестация: экзамен (указывается форма проведения)	6						6	
Итого	180						76	

*Лабораторные занятия, практические занятия относятся к практической подготовке обучающихся.

6. Фонд оценочных средств для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю)

6.1. Типовые задания и иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения:

Примеры вариантов контрольных работ :

1 вариант

- 1) Вывести интегралы площадей относительного движения в задаче двух тел.
- 2) Вычислить наименьшее и наибольшее гелиоцентрические расстояния Меркурия (среднее расстояние Меркурия от Солнца $a = 0,3871$ а. е., а его орбитальный эксцентриситет $e = 0,2056$).
- 3) Вычислить истинную аномалию астероида на орбите с эксцентриситетом $e = 0,5$ в момент времени, когда его эксцентрическая аномалия была равна $E = 90$ градусов.

2 вариант

- 1) Вывести интеграл энергии в задаче Кеплера
- 2) Вычислить наименьшее и наибольшее расстояния от Солнца планеты "Венера" (большая полуось орбиты $a = 0,7233$ а. е., орбитальный эксцентриситет $e = 0,006821$).
- 3) Малое тело Солнечной системы обращается вокруг Солнца по орбите с эксцентриситетом $e = 0,5$. Вычислить среднюю аномалию M этого тела в момент времени, когда его эксцентрическая аномалия была равна $E = 90$ градусов.

3 вариант

- 1) Вывести интегралы Лапласа в ограниченной задаче двух тел.
- 2) Большая полуось орбиты Земли равна $a = 1$ а. е. (или 149.6 миллионов километров), а ее орбитальный эксцентриситет составляет $1/60$ (или $e = 0,01679$).
Вычислить перигелийное и афелийное расстояния Земли (в километрах).
- 3) Метеороид на гелиоцентрической кеплеровой орбите с эксцентриситетом $e = 0,5$ в некоторый момент времени имеет эксцентрическую аномалию $E = 90$ градусов. Вычислить: чему равна в этот момент средняя аномалия метеороида?

4 вариант

- 1) Вывести аналитические соотношения между произвольными постоянными интегрирования в задаче об относительном движении двух тел.
- 2) Среднее расстояние планеты Марс от Солнца равно $a = 1,524$ а. е., а эксцентриситет ее орбиты $e = 0,09331$. Вычислить расстояния от Солнца до перигелия и афеля Марса.
- 3) Малая планета на кеплеровой орбите с эксцентриситетом $e = 0,5$ в некоторый момент времени имеет истинную аномалию $v = 90$ градусов. Чему равна в этот момент ее эксцентрическая аномалия?

Примеры вопросов к промежуточной аттестации:

1. Уравнения абсолютного движения в общей задаче трех тел. Определение первого интеграла, общего интеграла и общего решения уравнений движения. Вывод интегралов движения центра масс.
2. Вывод уравнений относительного движения. Определение общего решения уравнений абсолютного движения по общему решению уравнений относительного движения.

3. Вывод уравнений барицентрического движения и уравнений движения в поле неподвижного притягивающего центра.
4. Вывод интеграла площадей в относительном движении. Уравнение плоскости орбиты.
5. Вывод интеграла энергии в относительном движении. Поверхность нулевой скорости.
6. Вывод интегралов Лапласа.
7. Вывод двух зависимостей между интегралами относительного движения.
8. Интеграл, явно зависящий от времени, в относительных декартовых и орбитальных полярных координатах.
9. Общий интеграл дифференциальных уравнений относительного движения.
10. Вывод уравнения орбиты в относительных (декартовых) и орбитальных координатах.
11. Переход от относительной системы координат к орбитальной системе координат.
12. Кеплеровские элементы орбиты и их связь с произвольными постоянными интегрирования.
13. Получение общего решения в относительной системе координат двумя способами.
14. Интегрирование задачи двух тел с помощью уравнения Бине.
15. Общий интеграл дифференциальных уравнений абсолютного движения. Связь произвольных постоянных интегрирования в абсолютном и относительном движении.
16. Определение типа невозмущенного движения по кеплеровским элементам орбиты, по произвольным постоянным интегрирования, и по начальным условиям движения.
17. Определение эксцентрической аномалии. Вывод зависимости между эксцентрической и истинной аномалиями.
18. Вывод уравнения Кеплера. Решение уравнения Кеплера методом итераций.
19. Период обращения по эллиптической орбите. Определение масс планет, обладающих спутниками.
20. Алгоритм вычисления координат и скоростей в эллиптическом движении.
21. Вывод аналога уравнения Кеплера для гиперболического движения.
22. Алгоритм определения координат и скоростей в гиперболическом движении.
23. Вывод уравнения Баркера.
24. Алгоритм вычисления координат и скоростей в параболическом движении.
25. Вычисление невозмущенных эфемерид для малых тел Солнечной Системы.
26. Разложение координат и составляющих скорости эллиптического движения в ряды Фурье.
27. Разложения координат и скоростей эллиптического движения в ряды по возрастающим степеням эксцентриситета орбиты. Предел Лапласа.
28. Разложение координат и скоростей в эллиптическом движении в ряды по степеням времени.
29. Задача двух тел с переменными массами. Вывод уравнений Мещерского. Уравнения Гильдена - Мещерского и уравнения Мещерского-Леви Чивиты. Консервативная задача двух тел с переменными массами: вывод первых интегралов относительного движения в этой задаче.
30. Дифференциальные уравнения абсолютного движения и десять интегралов задачи "N" тел. Формулировки теорем о несуществовании других интегралов, отличных от десяти классических.
31. Вывод формулы Лагранжа-Якоби и ее астрономические приложения.
32. Дифференциальные уравнения относительного движения в задаче "N" тел. Пертurbationционная функция. Дифференциальные уравнения барицентрического движения. Уравнения движения задачи "N" тел в относительных координатах Якоби.
33. Определение оскулирующего движения небесного объекта. Основная операция для вывода дифференциальных уравнений в оскулирующих элементах.
34. Вывод уравнений Ньютона-Эйлера для фокального параметра, долготы восходящего узла и наклонения орбиты.

35. Вывод уравнений Ньютона-Эйлера для орбитального эксцентризитета, аргументаperiцентра и средней аномалии в эпоху. Особенности в правых частях уравнений Ньютона-Эйлера.
36. Метод вариации произвольных постоянных для канонических уравнений задачи двух тел. Элементы Якоби. Вывод явной зависимости элементов Якоби и кеплеровых элементов с помощью решения уравнения Гамильтона-Якоби методом разделения переменных.
37. Вывод уравнений Лагранжа в оскулирующих кеплеровских элементах, используя канонические уравнения возмущенного движения в элементах Якоби.
38. Аналитическая структура решения уравнений для оскулирующих элементов с учетом зависимости их правых частей от малого параметра. Форма рядов для представления правых частей дифференциальных уравнений возмущенного движения. Порядок возмущений в элементах, вековые и периодические возмущения.
39. Теорема Лапласа о возмущениях первого порядка в большой полуоси (орбиты).
40. Теорема Лапласа об устойчивости Солнечной системы.
41. Ограниченнная круговая задача трех тел. Вывод дифференциальных уравнений движения и первого интеграла Якоби.
42. Точки либрации в ограниченной круговой задаче трех тел.
43. Поверхности нулевой относительной скорости. Устойчивость движения по Хиллу.
44. Ограниченнная эллиптическая задача трех тел: вывод уравнений движения. Строгие частные решения и точки либрации.
45. Гомографические частные решения общей задачи трех тел.
46. Поверхности Зундмана в общей задаче трех тел.
47. Квазинтеграл Якоби в ограниченной эллиптической задаче трех тел. Закон сохранения энергии. Поверхности минимальной энергии.
48. Гомановские перелеты космических аппаратов. Межпланетные перелеты.
49. Влияние нецентральности поля тяготения Земли на движения искусственных спутников Земли (ИСЗ).
50. Влияние сопротивления атмосферы на движение искусственных спутников Земли.

6.2. Шкала и критерии оценивания

(шкала и критерии оценивания могут быть типовыми для всех дисциплин (модулей), входящих в ОПОП ВО)

7. Ресурсное обеспечение

- Перечень основной и дополнительной учебной литературы

Основная литература

1. Дубошин Г.Н. НЕБЕСНАЯ МЕХАНИКА. Основные задачи и методы. Изд. 3-е, доп., Москва: "Наука", Гл. ред. физ. - мат. лит., 1975, 799 стр.
2. Субботин М.Ф. Введение в теоретическую астрономию. Москва: "Наука", Гл. ред. физ.-мат. лит., 1968, 800 стр.
3. Лукьянов Л.Г., Ширмин Г.И. Лекции по небесной механике. Учеб. пособие для вузов. – Алматы: "Эверо", 2009. – 277 стр.
4. Холшевников К.В., Титов В.Б. Задача двух тел. Санкт Петербург: изд-во СПбГУ, 2007, 178 стр.
5. Балк М.Б., Демин В.Г., Куницын А.Л. Сборник задач по небесной механике и космодинамике. Москва: "Наука", 1972, 336 стр.

Дополнительная литература

- 1). Аксенов Е.П. Движение искусственных спутников Земли. Москва: "Наука", Гл. ред. физ.-мат. лит., 1977, 360 стр.
- 2). Гребеников Е.А., Рябов Ю.А. Новые качественные методы в небесной механике. Москва: "Наука", Гл. ред. физ. - мат. лит., 1971, 442 стр.
- 3). Дубошин Г.Н. НЕБЕСНАЯ МЕХАНИКА. Аналитические и качественные методы. Москва: "Наука", Гл. ред. физ.-мат. лит., 1964, 560 стр.
- 4). Эльясберг П.Е. Введение в теорию полета искусственных спутников Земли. Москва: "Наука", Гл. ред. физ.-мат. лит., 1965, 540 стр.

Периодическая литература

- 1). Лукьянов Л.Г. О законе сохранения энергии в ограниченной эллиптической задаче трех тел. Астрономический журнал, том 82, № 12, 2005, с. 1137-1147.
- 2). Лукьянов Л.Г., Ширмин Г.И. Поверхности Зундмана и устойчивость по Хиллу в задаче трех тел. Письма в Астрономический Журнал, т. 33, № 8, 2007, с. 618-630.
- 3). Poincare H. Les limites de la loi de Newton. Bull. astr., vol. 17, pp. 121-269.

- Перечень лицензионного и (или) свободно распространяемого программного обеспечения _____ (*приводится при необходимости*)
- Перечень профессиональных баз данных и информационных справочных систем _____ (*приводится при необходимости*)
 - Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» _
 - <http://www.sai.msu.ru/neb/rw/textbook.htm>
 - http://www.sai.msu.ru/neb/rw/cm_monog.htm
- Описание материально-технической базы
 - Курс читается в поточной аудитории при наличии: работающих электрических розеток, компьютера, проектора, экрана, учебной доски*(приводится при необходимости)*

8. Язык преподавания: русский

(отдельно укажите, если дисциплина может быть реализована на иностранном языке).