

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)

Физический факультет

УТВЕРЖДАЮ:  
декан физического факультета  
С.Н. Филимонов

Рабочая программа дисциплины

**Небесная механика**

по направлению подготовки

**03.03.02 Физика**

Направленность (профиль) подготовки:  
**«Фундаментальная физика»**

Форма обучения  
**Очная**

Квалификация  
**Бакалавриат**

Год приема  
**2024**

СОГЛАСОВАНО:  
Руководитель ОП  
О.Н. Чайковская

Председатель УМК  
О.М. Сюсина

Томск – 2024

## **1. Цель и планируемые результаты освоения дисциплины (модуля)**

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

ОПК-2 Способен проводить научные исследования физических объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные.

ПК-1 Способен проводить научные исследования в выбранной области с использованием современных экспериментальных и теоретических методов, а также информационных технологий.

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

ИОПК 2.2 Анализирует и интерпретирует экспериментальные и теоретические данные, полученные в ходе научного исследования, обобщает полученные результаты, формулирует научно обоснованные выводы по результатам исследования

ИПК 1.1 Собирает и анализирует научно-техническую информацию по теме исследования, обобщает научные данные в соответствии с задачами исследования

## **2. Задачи освоения дисциплины**

знакомство с основами классической небесной механики, задачами, решаемыми в рамках данной дисциплины, и обучение основными методами их решения.

## **3. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы**

Дисциплина относится к обязательной части образовательной программы.

## **4. Семестр(ы) освоения и форма(ы) промежуточной аттестации по дисциплине**

Семестр 6, экзамен.

## **5. Входные требования для освоения дисциплины**

Для успешного освоения дисциплины требуются результаты обучения по следующим дисциплинам: Линейная алгебра и аналитическая геометрия, Дифференциальные уравнения, Классическая механика, Программирование, Технология программирования.

## **6. Язык реализации**

Русский

## **7. Объем дисциплины (модуля)**

Общая трудоемкость дисциплины составляет 4 з.е., 144 часа, из которых:

– лекции: 32 ч.;

– практические занятия: 48 ч.;

Объем самостоятельной работы студента определен учебным планом.

## **8. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам**

### **Тема 1. Введение. Предмет изучения и основные понятия**

Предмет небесной механики. Основные задачи небесной механики. Краткая историческая справка. Связь с другими дисциплинами.

### **Тема 2. Основные понятия теории притяжения**

Физические законы, которые лежат в основе орбитального движения тел Солнечной системы. Закон притяжения Ньютона. Силовая функция взаимного притяжения системы материальных точек. Свойства силовой функции

### **Тема 3. Невозмущенное кеплеровское движение**

Задача двух тел. Постановка задачи. Дифференциальные уравнения движения в абсолютной и относительной системах координат. Первые интегралы уравнений движения: интегралы площадей, энергии и интегралы Лапласа. Типы невозмущенного движения: эллиптическое, гиперболическое, параболическое, круговое. Обобщенные законы Кеплера. Кеплеровские элементы орбиты. Уравнение Кеплера. Разложение в ряды Фурье

#### **Тема 4. Задача n тел**

Постановка задачи и дифференциальные уравнения движения в абсолютных координатах. Интегралы движения центра масс системы, интегралы площадей и энергии. Об интегрируемости задачи n тел. Дифференциальные уравнения относительного движения n тел. Уравнения в барицентрической системе координат. Планетная форма уравнений. Возмущающая функция. Уравнения Лагранжа второго рода. Уравнения движения в координатах Якоби. Канонические уравнения и их интегралы. Канонические преобразования.

#### **Тема 5. Теория возмущенного движения.**

Метод Лагранжа вариации произвольных постоянных. Оскулирующие орбитальные элементы. Вывод дифференциальных уравнений Ньютона для оскулирующих кеплеровских элементов. Уравнения Лагранжа в оскулирующих кеплеровских элементах. Приближенное интегрирование уравнений Ньютона. Метод последовательных приближений Пикара. Структура возмущений элементов: вековые, периодические, смешанные и резонансные возмущения.

#### **Тема 6. Ограниченная задача трех тел**

Уравнения движения в инерциальной и вращающейся системах координат. Интеграл Якоби. Поверхности нулевой скорости. Области возможного движения тела «нулевой массы». Частные решения ограниченной задачи трёх тел (лагранжевы решения). Точки либрации: коллинеарные и треугольные.

### **9. Текущий контроль по дисциплине**

Текущий контроль по дисциплине проводится путем контроля посещаемости, проведения контрольных работ (контрольная работа включает в себя задачи), опросов по лекционному материалу, решений практических заданий по теме «Задача двух тел» и фиксируется в форме контрольной точки не менее одного раза в семестр.

*Примеры теоретических вопросов к тестам (проверяет ИОПК 2.2):*

1. Основная задача небесной механики.
2. Постановка задачи двух тел
3. Уравнения относительного движения.
4. Первые интегралы невозмущенного кеплеровского движения.
5. Плоскость Лапласа
6. Что представляет собой орбита в задаче двух тел.
7. Что такое ось апсид, перицентр, апоцентр, истинная аномалия
8. Как вводится прямоугольная орбитальная система
9. Как вводится полярная орбитальная система
10. Кеплеровы элементы: угловое расстояние перицентра от узла, долгота восходящего узла, наклонение.

11. Аргумент широты
12. Круговая, параболическая, эллиптическая и гиперболическая начальные скорости
13. Уравнение траектории в полярных координатах орбитальной системы координат
14. Уравнение Кеплера.
15. Сформулировать обобщенные законы Кеплера.
16. Когда задача называется невозмущенной и кеплеровой?
17. Среднее движение, средняя аномалия, эксцентрическая аномалия
18. Основная задача n-тел
19. Интегрируемость задачи n-тел
20. Классические интегралы задачи n-тел (количество, названия)
21. Абсолютная система координат
22. Свойства силовой функции
23. Барицентрическая система координат
24. Планетная форма уравнений движения. Возмущающая функция
25. Уравнения Лагранжа 2 рода
26. Система координат Якоби
27. Общий вид уравнений в возмущенной задаче.
28. Основная идея метода Лагранжа
29. Математический смысл метода Лагранжа
30. Геометрический смысл метода Лагранжа
31. Динамический смысл метода Лагранжа
32. Что представляет собой истинная орбита и истинное движение в методе Лагранжа
33. Основная операция

*Пример практического задания:*

Задание: Для случая гиперболической орбиты получить выражения для координат и скоростей через величину  $F$  (проверяет ИОПК 2.2, ИПК 1.1).

1. Найти зависимость  $r=f(F)$
2. Найти зависимость  $\cos v=f(F)$ ,  $\sin v=f(F)$
3. Найти зависимость для  $\xi=\xi(F)$ ,  $\eta=\eta(F)$  и их производных по времени.
4. Написать последовательность решения задачи (переход от кеплеровых элементов к координатам и скоростям) в случае гиперболической орбиты.
5. По заданным значениям кеплеровых элементов найти значение декартовых координат на заданный момент времени

Практические задания оцениваются на «зачтено» и «не зачтено».

Таблица 1. Критерии оценивания практической работы

|                   |                                                                                                                                                                                                |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>зачтено</b>    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Получены верные результаты расчетов</li> <li>- Оформлен отчет по работе</li> <li>- Написан программный код для решения поставленной задачи</li> </ul> |
| <b>Не зачтено</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Получены не верные результаты расчетов</li> <li>- Не оформлен отчет по работе</li> </ul>                                                              |

*Примеры задач из контрольной работы (проверяет ИПК 1.1).:*

1. Эксцентриситет орбиты ракеты составляет 0.450, а ее большая полуось – 3.8 а.е. Найдите постоянную площадей движения ракеты вокруг Солнца.
2. Космический зонд на геоцентрическом расстоянии 8000 км имел скорость 2.31 км/с. Какую скорость имел зонд на расстоянии 630 км от поверхности Земли?  $K_3 = 398.60 \times 10^3 \text{ км}^3/\text{с}^2$ . Радиус Земли 6371 км.
3. Американская космическая ракета «Пионер-5», запущенная в сторону Луны 11 марта 1960 г. и ставшая искусственной планетой, имела период обращения вокруг Солнца 312 суток. Гелиоцентрическое расстояние перигелия орбиты ракеты равно  $120 \cdot 10^6$  км. Вычислите гелиоцентрическое расстояние ракеты в афелии.

*Критерии оценивания:* Контрольная работа оценивается на «зачтено» и «не зачтено». «Зачтено» ставится при правильном решении всех задач.

## **10. Порядок проведения и критерии оценивания промежуточной аттестации**

Экзамен в шестом семестре проводится в устной форме по билетам. Студент допускается к экзамену, если он получил отметку «зачтено» за все практические задания. Экзаменационный билет состоит из двух теоретических вопросов по темам лекций. На экзамене проверяются результаты освоения дисциплины по индикаторам ИОПК 2.2. Результаты экзамена определяются оценками «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно».

*Примеры экзаменационных вопросов в билетах*

1. Основная задача небесной механики. Закон притяжения Ньютона, силовая функция взаимного притяжения системы материальных точек, свойства силовой функции.
2. Дифференциальные уравнения движения в абсолютных осях в задаче двух тел
3. Уравнения относительного движения в задаче двух тел
4. Невозмущенное кеплеровское движение: интегралы площадей
5. Невозмущенное кеплеровское движение: интеграл энергии
6. Невозмущенное кеплеровское движение: интегралы Лапласа, вектор Лапласа, определение типа орбиты по величине вектора Лапласа, плоскость Лапласа
7. Невозмущенное кеплеровское движение: уравнение орбиты.
8. Невозмущенное кеплеровское движение: уравнение орбиты в прямоугольных орбитальных координатах.
9. Невозмущенное кеплеровское движение: уравнение орбиты в полярных координатах.
10. Невозмущенное кеплеровское движение: кеплеровские элементы невозмущенного движения
11. Невозмущенное эллиптическое движение: выражение прямоугольных координат и компонент скорости через кеплеровские элементы орбиты.
12. Невозмущенное кеплеровское движение: обобщенные законы Кеплера
13. Исследование невозмущенного кеплеровского движения: основные типы кеплеровского движения (как характеризуется по величине эксцентриситета, вектора Лапласа, постоянной интеграла энергии, величины начальной скорости).
14. Невозмущенное кеплеровское движение: зависимость формы и размеров орбиты от величины и направления начальной скорости.
15. Исследование невозмущенного кеплеровского движения: эллиптическое движение, кеплеровские элементы орбиты, уравнение Кеплера.
16. Невозмущенное кеплеровское движение: кеплеровские элементы орбиты: истинная, эксцентрическая и средняя аномалии, их геометрический смысл.

17. Исследование невозмущенного кеплеровского движения: гиперболическое движение
18. Исследование невозмущенного кеплеровского движения: параболическое движение
19. Разложение координат невозмущенного эллиптического движения в ряды Фурье.
20. Задача  $n$  тел: постановка задачи, дифференциальные уравнения движения в абсолютных координатах, интегрируемость задачи  $n$  тел.
21. Задача  $n$  тел: силовая функция и ее свойства
22. Задача  $n$  тел: интегралы площадей дифференциальных уравнений в абсолютных координатах
23. Задача  $n$  тел: интегралы центра масс и интеграл энергии дифференциальных уравнений в абсолютных координатах.
24. Задача  $n$  тел. Дифференциальные уравнения относительного движения: уравнения в барицентрической системе координат.
25. Задача  $n$  тел. Дифференциальные уравнения относительного движения: планетная форма уравнений.

Результаты экзамена определяются оценками «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно».

Оценка «отлично» ставится при правильном ответе не менее чем на 90% вопросов билета и дополнительных вопросов. Оценка «хорошо» ставится при правильном ответе не менее чем на 75% вопросов билета и дополнительных вопросов. Оценка «удовлетворительно» ставится при правильном ответе не менее чем на 60% вопросов билета и дополнительных вопросов. Оценка «неудовлетворительно» ставится при правильном ответе менее чем на 60% вопросов билета и дополнительных вопросов.

## 11. Учебно-методическое обеспечение

- а) Электронный учебный курс по дисциплине в электронном университете «Moodle» - <https://moodle.tsu.ru/course/view.php?id=00000>
- б) Оценочные материалы текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.
- в) План семинарских / практических занятий по дисциплине.
- г) Методические указания по проведению лабораторных работ.
- д) Методические указания по организации самостоятельной работы студентов.

## 12. Перечень учебной литературы и ресурсов сети Интернет

- а) основная литература:
  - Морбидели А. Современная небесная механика. –М.–Ижевск: Институт компьютерных исследований.2014.–432 с
  - Дубошин Г.Н. Небесная механика. Основные задачи и методы. М.: Наука, 1975. 432 с.
  - Холшевников К.В., Титов В.Б. Задача двух тел: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2007. 180 с.
  - Эскобал П. Методы определения орбит. М.: Мир, 1970. 457 с.
  - Быков О.П., Холшевников К.В. Прямые методы определения орбит небесных тел: Учеб. пособие. СПб: Изд-во СПбГУ, 2013. 151 с.
- б) дополнительная литература:
  - Себехей В. Теория орбит. М.: Наука, 1982.
  - Murray C.D., Dermot S.F. Solar system dynamics. Cambridge: Cambridge University Press., 1999. / Мюррей К., Дермотт С. Динамика Солнечной системы / Перевод с англ. Под редакцией И. И. Шевченко. М.: Физматлит, 2009. 588 с.

- в) ресурсы сети Интернет:

– Общероссийская Сеть КонсультантПлюс Справочная правовая система.  
<http://www.consultant.ru>

### **13. Перечень информационных технологий**

- а) лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:
- Microsoft Office Standart 2013 Russian: пакет программ. Включает приложения: MS Office Word, MS Office Excel, MS Office PowerPoint, MS Office On-eNote, MS Office Publisher, MS Outlook, MS Office Web Apps (Word Excel MS PowerPoint Outlook);
  - публично доступные облачные технологии (Google Docs, Яндекс диск и т.п.).

б) информационные справочные системы:

– Электронный каталог Научной библиотеки ТГУ –  
<http://chamo.lib.tsu.ru/search/query?locale=ru&theme=system>

– Электронная библиотека (репозиторий) ТГУ –  
<http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Index>

- ЭБС Лань – <http://e.lanbook.com/>
- ЭБС Консультант студента – <http://www.studentlibrary.ru/>
- Образовательная платформа Юрайт – <https://urait.ru/>
- ЭБС ZNANIUM.com – <https://znanium.com/>
- ЭБС IPRbooks – <http://www.iprbookshop.ru/>

### **14. Материально-техническое обеспечение**

Аудитории для проведения занятий лекционного типа.

Аудитории для проведения занятий семинарского типа, индивидуальных и групповых консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации.

Помещения для самостоятельной работы, оснащенные компьютерной техникой и доступом к сети Интернет, в электронную информационно-образовательную среду и к информационным справочным системам.

### **15. Информация о разработчиках**

Сюсина Ольга Михайловна, к ф.-м. н., доцент кафедры АиКГ ФФ ТГУ