

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

Аналитические методы небесной механики

по направлению подготовки

03.04.02 Физика

Направленность (профиль) подготовки:
«Фундаментальная и прикладная физика»

Форма обучения
Очная

Квалификация
Магистр

Год приема
2025

СОГЛАСОВАНО:
Руководитель ОП
О.Н. Чайковская

Председатель УМК
О.М. Сюсина

Томск – 2025

1. Цель и планируемые результаты освоения дисциплины (модуля)

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

– ПК-1 – Способен самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области физики и решать их с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного опыта;

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

– ИПК-1.1 – Знает основные стратегии исследований в выбранной области физики, критерии эффективности, ограничения применимости;

– ИПК-1.2 – Умеет выделять и систематизировать основные цели исследований в выбранной области физики, извлекать информацию из различных источников, включая периодическую печать и электронные коммуникации, представлять её в понятном виде и эффективно использовать.

2. Задачи освоения дисциплины

– Освоить аналитические методы небесной механики.

– Научиться применять понятийный аппарат аналитической небесной механики... для решения практических задач профессиональной деятельности.

3. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы

Дисциплина относится к части образовательной программы, формируемой участниками образовательных отношений, предлагается обучающимся на выбор.

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

Семестр 1, зачет.

Семестр 2, экзамен.

5. Входные требования для освоения дисциплины

Для успешного освоения дисциплины требуются компетенции, сформированные в ходе освоения образовательных программ предшествующего уровня образования.

Для успешного освоения дисциплины требуются результаты обучения по следующим дисциплинам: Классическая механика, Математическая физика, Небесная механика.

6. Язык реализации

Русский

7. Объем дисциплины (модуля)

Общая трудоемкость дисциплины составляет 6 з.е., 216 часов, из которых:

– лекции: 72 ч.;

– семинарские занятия: 72

в том числе практическая подготовка: 36 ч.

Объем самостоятельной работы студента определен учебным планом.

8. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам

Тема 1. Разложение по степеням времени.

Постановка задачи. Метод Коши. Ряды Софуса Ли

Тема 2 Принципы разложения возмущающей функции в ряд. Способы группировки рядов Пуассона.

Тема 3. Метод малого параметра Ляпунова – Пуанкаре.

Понятие возмущения в небесной механике. Малые параметры. Уравнения метода малого параметра

Тема 4. Обобщенный метод Лагранжа вариации произвольных постоянных.

Основной принцип метода вариации произвольных постоянных. Применение метода в возмущенной задаче двух тел. Промежуточные орбиты. Обобщенный метод Лагранжа

Тема 5. Методы осреднения уравнений небесной механики (общий подход)

Общие принципы, замена переменных, решение уравнений замены переменных, исследование уравнений в осредненных переменных. Связь метода малого параметра и метода осреднения.

Тема 6. Метод Крылова –Боголюбова: преобразования от исходных переменных к осредненным, основная операция, сведение к системам уравнений в частных производных.

Тема 7. Метод Делоне-Цайпеля, каноническое преобразования от исходных переменных к осредненным. Производящая функция и ее особенности.

Тема 8. Метод рядов и преобразований Ли (Хори-Депри).

Преобразование от исходных переменных к осредненным в виде дифференциального уравнения по малому параметру, теорема Ли, дифференциальный оператор Ли, сведение к скобкам Пуассона, алгоритм метода.

Тема 9. Многомерные интегрируемые системы и их свойства

Понятие интегрируемой системы. Гамильтоновы интегрируемые системы. Свойства интегрируемых систем. Теорема Лиувилля-Арнольда. Интегральные инварианты Пуанкаре. Переменные действие-угол Теорема Пуанкаре о возвратах. Инвариантные торы: инвариантные торы в двухчастотной системе; понятие инвариантного тора в многочастотной системе.

Тема 10. Сильно возмущенные системы. Асимптотические решения.

Понятие сильно возмущенной системы. Свойства сильно возмущенных систем. Построение асимптотических решений. Проблема малых знаменателей. Понятие малого знаменателя, источники малых знаменателей. Классификация резонансов. Основные определения и примеры. Резонансные соотношения в Солнечной системе. Орбитальные и вековые резонансы.

Тема 11. Теорема и метод Колмагорова.

Формулировка теоремы и ее геометрическая интерпретация. Метод Колмагорова с квадратичной сходимостью и его обоснование.

Тема 12. Хаотичность динамических систем. Метод ляпуновских характеристик.

Понятие хаотичности динамических систем. Ляпуновские характеристики и их свойства. Быстрые ляпуновские индикаторы.

Тема 13. Доказательство устойчивости Солнечной системы в целом.

Свойства динамики планет гигантов, особенности динамики внутренних планет, стабилизация в системе Земля-Луна.

9. Текущий контроль по дисциплине

Текущий контроль по дисциплине проводится путем контроля посещаемости, проведения контрольных работ, тестов по лекционному материалу, выполнения домашних заданий, и фиксируется в форме контрольной точки не менее одного раза в семестр.

10. Порядок проведения и критерии оценивания промежуточной аттестации

1. Методы построения разложений по степеням времени. Метод Коши. Ряды Софуса Ли

2. Принципы разложения возмущающей функции в ряд. Способы группировки рядов Пуассона.
3. Метод малого параметра Ляпунова – Пуанкаре.
4. Понятие возмущения в небесной механике. Малые параметры. Уравнения метода малого параметра
5. Обобщенный метод Лагранжа вариации произвольных постоянных.
6. Понятие промежуточной орбиты. Примеры промежуточных орбит
7. Методы осреднения уравнений небесной механики (общий подход)
8. Общие принципы, замена переменных, решение уравнений замены переменных, исследование уравнений в осредненных переменных.
9. Связь метода малого параметра и метода осреднения.
10. Метод Крылова –Боголюбова: преобразования от исходных переменных к осредненным, основная операция, сведение к системам уравнений в частных производных.
11. Метод Делоне-Цайпеля, каноническое преобразования от исходных переменных к осредненным. Производящая функция и ее особенности.
12. Метод рядов и преобразований Ли (Хори-Депри).
Преобразование от исходных переменных к осредненным в виде дифференциального уравнения по малому параметру, теорема Ли, дифференциальный оператор Ли, сведение к скобкам Пуассона, алгоритм метода.

Примеры задач:

1. Задача 1.

Объясните, каким образом основной недостаток метода Делоне–Цейпеля (зависимость производящей функции одновременно от старых и новых переменных) устраняется в методе рядов и преобразований Ли.

2. Задача 2

Запишите замены переменных в трех методах усреднения Крылова-Боголюбова, Делоне–Цейпеля и Хори–Депри (метод рядов и преобразований Ли) и сравните их.

3. Задача 3

Получите обобщенным методом Лагранжа уравнения в возмущениях переменных для возмущенного гармонического осциллятора

Результаты зачета оцениваются «зачтено», «незачтено».

Экзамен во втором семестре проводится в письменной форме по билетам. Экзаменационный билет состоит из трех частей. Продолжительность экзамена 1,5 часа.

Структура экзамена соответствует компетентностной структуре дисциплине. Система оценивания итогового контроля по дисциплине позволяет продемонстрировать достижение всех запланированных индикаторов – результатов обучения.

Первая часть представляет собой тест из 5 вопросов, проверяющих ИПК–1.1 , то есть знание основных понятий и стратегий в области аналитической небесной механики.

Вторая часть содержит один вопрос, проверяющий ИПК-1.2. Ответ на вопрос второй части дается в развернутой форме.

Третья часть содержит 2 вопроса, проверяющих ИПК-1.3, оформленные в виде практических задач. Ответы на вопросы третьей части предполагают решение задач и краткую интерпретацию полученных результатов.

Примерный перечень вопросов для теста

1. Что называется возмущающей силой.
2. Что такое малый параметр.
3. Ряд Пуассона для задач небесной механики.
4. Понятие орбитального резонанса.
5. Понятие векового резонанса.

6. Понятие усреднения в динамических системах
7. Операторы усреднения
8. Почему системы небесной механики называются сильно возмущенными
9. Что понимается под собственным вырождением в динамических системах.
10. Понятие инвариантного тора
11. Хаотичность в динамических системах
12. Приведите пример быстрого ляпуновского индикатора
13. Какую проблему решает метод Колмагорова
14. Устойчива ли Солнечная система и за счет чего
15. Что является фактором стабилизирующим эволюцию системы Земля-Луна

Примерный перечень теоретических вопросов

1. Понятие интегрируемой системы. Гамильтоновы интегрируемые системы. Свойства интегрируемых систем.
2. Теорема Лиувилля-Арнольда.
3. Интегральные инварианты Пуанкаре
4. Переменные действие-угол.
5. Теорема Пуанкаре о возвратах.
6. Инвариантные торы: инвариантные торы в двухчастотной системе; понятие инвариантного тора в многочастотной системе.
7. Понятие сильно возмущенной системы. Свойства сильно возмущенных систем.
8. Построение асимптотических решений.
9. Проблема малых знаменателей. Понятие малого знаменателя, источники малых знаменателей. Классификация резонансов. Основные определения и примеры.
10. Резонансные соотношения в Солнечной системе. Орбитальные и вековые резонансы.
11. Формулировка теоремы Колмагорова и ее геометрическая интерпретация.
12. Метод Колмагорова с квадратичной сходимостью и его обоснование.
13. Хаотичность динамических систем. Метод ляпуновских характеристик.. Быстрые ляпуновские индикаторы.
14. Доказательство устойчивости Солнечной системы в целом.
15. Свойства динамики планет гигантов, особенности динамики внутренних планет,
16. Стабилизация в системе Земля-Луна.

Примеры задач:

Задача 1.

Дан динамический портрет орбитальной эволюции объекта и его резонансные характеристики.

Требуется дать объяснение особенностей орбитальной эволюции объекта

Задача 2

Дана хаотическая структура некоторой области орбитального пространства и структура резонансов этой области.

Требуется дать объяснение причинам возникновения хаотичности.

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

Задача 3. Динамическую систему можно свести к переменным угол-действие. Что Вы можете сказать об интегрируемости системы.

Задача 4. Задана конкретная двухчастотная система. Изобразите геометрически инвариантный тор для этой системы.

Задача 5. Дан отрезок ряда Пуассона и его частотный базис. Покажите где за счет чего при интегрировании ряд а возникают малые знаменатели.

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 занятий по дисциплине.
- д) Методические указания по организации самостоятельной работы студентов.

12. Перечень учебной литературы и ресурсов сети Интернет

а) основная литература:

- **Основная литература.**

1. Морбидели А. Современная небесная механика. –М.–Ижевск: Институт компьютерных исследований.2014.–432 с.
2. Мозер Ю. [КАМ-теория и проблемы устойчивости](#) 2001. 437 с. Time modified: 2016-03 (Russian, djvu) УМН 18 с 13
3. Arnold V., Kozlov V., Neishtadt A. Khukhro E. [Mathematical Aspects of Classical and Celestial Mechanics](#) .– Springer. 2006.266 p Time modified: 2016-03 (English, pdf)

- **Дополнительная литература**

1. Arnold V. I. [Collected Works: Representations of Functions, Celestial Mechanics and KAM Theory, 1957–1965](#) Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2009. 497 p. Time modified: 2016-03 (English, pdf)
2. Гребеников Е. А., Рябов Ю. А. [Резонансы и малые знаменатели в небесной механике](#). М. :Наука. 1978. 128 с
3. Брумберг В.А. Аналитические алгоритмы небесной механики. М.: Наука, 1980. 208 с.
4. Холшевников К.В. Асимптотические методы небесной механики. Л.: Изд-во Лен. ун-та, 1985. 208 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

Бордовицына Татьяна Валентиновна, доктор физико-математических наук, профессор, Томский государственный университет, профессор.