

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

**УТВЕРЖДЕНО**  
**Директор физтех-школы**  
**аэрокосмических технологий**  
**С.С. Негодяев**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Введение в баллистику
<b>по направлению:</b>	Техническая физика
<b>профиль подготовки:</b>	Техническая физика космических летательных аппаратов Физтех-школа Аэрокосмических Технологий центр образовательных программ ФАКТ
<b>курс:</b>	3
<b>квалификация:</b>	бакалавр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

5 (осенний) - Дифференцированный зачет

6 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 120 всего, в том числе:

лекции: 0 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 120 час.

Самостоятельная работа: 165 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 315, всего зач. ед.: 7

Программу составили:

А.А. Кузнецов, преподаватель

И.И. Фукин, ассистент

Н.А. Завьялова, канд. физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании центра образовательных программ ФАКТ 02.12.2024

## Аннотация

Курс «Введение в баллистику» посвящен задаче моделирования движения тела в околоземном пространстве. В курсе рассматривается постановка задачи движения тела в различных системах отсчета, модели различных сил, действующих на тело в космическом пространстве, а также основные принципы их компьютерной реализации.

### 1. Цели и задачи

#### Цель дисциплины

- изучение основных теоретических понятий, концепций и подходов, используемых для высокоточного моделирования движения тела в околоземном пространстве.

#### Задачи дисциплины

- приобретение базовых знаний о моделировании движения космического аппарата в околоземном пространстве;
- приобретение базовых знаний о системах отсчета, используемых в Солнечной системе;
- приобретение базовых знаний о временных шкалах;
- приобретение базовых знаний о возмущающих силах, действующих на тело в околоземном пространстве;
- освоение современных подходов к реализации численных моделей на персональном компьютере.

### 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Способен использовать фундаментальные законы природы и основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности	ОПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями и законами современных естественнонаучных дисциплин в сфере своей профессиональной деятельности
	ОПК-1.2 Использует необходимые физические законы и понимает границы их применимости
ОПК-2 Способен применять методы математического анализа, математического моделирования и оптимизации для решения задач, возникающих в ходе профессиональной деятельности	ОПК-2.1 Знаком с основными методами математического анализа, математического моделирования и оптимизации
	ОПК-2.2 Способен строить математические модели, производить количественные расчеты и оценки
	ОПК-2.3 Способен определять границы применимости полученных результатов

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- физические основы моделирования движения тела в околоземном пространстве;
- математические основы моделирования движения тела в околоземном пространстве;
- основные алгоритмические подходы для моделирования движения тела в околоземном пространстве;
- оценивать сложность алгоритмов для моделирования движения тел в околоземном пространстве.

уметь:

- выбирать ту или иную физическую модель в зависимости от необходимой точности для решения задачи движения тела в околоземном пространстве;
- выбирать ту или иную математическую модель в зависимости от необходимой точности для решения задачи движения тела в околоземном пространстве.

владеть:

- теоретическим и понятийным аппаратом, используемым в науках, связанных с моделированием движения тела в околоземном пространстве.

#### 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	Законы Ньютона, системы отсчета			4	7
2	Гравитационное воздействие на тело			20	15
3	Модели атмосферы			8	9
4	Аэродинамическое сопротивление			12	11
5	Солнечное давление			4	7
6	Давление отраженного света от Земли			4	7
7	Излучение Земли			4	7
8	Релятивистские поправки			4	12
9	Явные одношаговые методы решения задачи движения			8	14
10	Многошаговые методы решения задачи движения			8	11
11	Неявные методы Рунге-Кутты. Коллокационные методы			8	11
12	Методы Гаусса. Интегратор Эверхарта			8	9
13	Интерполяция баллистической траектории. Dense-output			4	12
14	Задача определения орбиты по измерениям. Методы оптимизации			8	9
15	Замена координат интегрирования			4	12
16	Задача маневрирования			12	12
Итого часов				120	165
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		315 час., 7 зач.ед.			

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

Семестр: 5 (Осенний)

###### 1. Законы Ньютона, системы отсчета

Первый закон Ньютона, инерциальные системы, второй закон Ньютона. Системы координат и шкалы времени. Способы записи времени: календарь, jd, mjd, J2000, Unix-time. Шкалы времени TAI, TT, UT1, UTC, TCB, TDB, их определения и конвертации друг в друга. Системы координат BCRS, GCRS, ITRS и TEME, их определение и конвертация друг в друга.

###### 2. Гравитационное воздействие на тело

Положение небесных тел в Солнечной системе. Эфемериды. Обработка файла Эфемерид. Гравитация материальной точки. Гравитация реального тела, Гауссов ряд, полиномы Лежандра, присоединенные полиномы Лежандра и их свойства. Способы расчета ряда Гаусса, Алгоритм Клиншоу. Сингулярность Гауссова ряда в сферических координатах. Гауссов ряд в декартовых координатах. Tide-free модели гравитационного потенциала, модели EGM-96, EGM-2008 и EGM-2020, темпоральные модели. Вековые изменения гравитационного воздействия, приливные воздействия, твердотельные и океанические приливы. Модели Лявы и Варры твердотельных приливов, Фундаментальные аргументы Дудсона, модели океанических приливов.

### 3. Модели атмосферы

Статические модели. Модель ГОСТ - 4401-81. Космическая погода, индексы солнечной активности, индексы магнитной активности. Динамические модели атмосферы, модель ГОСТ Р 25645.166-2004. Зарубежные динамические модели JB-2006, JB2008, NRLMSISE-00 и ее последующие издания.

### 4. Аэродинамическое сопротивление

Число Кнудсена. Свободномолекулярные течения. Гипотермический и гипертермические режимы. Способы моделирования аэродинамического сопротивления в разреженных газах: Кинетическое уравнение Больцмана, метод частиц, метод панелей и трассировка лучей. Взаимодействие газа с поверхностью. Способы реализации методов.

### 5. Солнечное давление

Мощность солнечного излучения у Земли. Солнечные циклы, приближенные формулы для их предсказания. Моделирование солнечного давления при помощи метода панелей и трассировки лучей, взаимодействие фотонов с поверхностью.

### 6. Давление отраженного света от Земли

Закон Ламберта, трассировка лучей. Альбедо. Виды Альбедо. Альбедо Земли. Построение сетки на поверхности Земли.

### 7. Излучение Земли

Абсолютно черное тело, серое тело. Различные температуры Земли. Трассировка Лучей. Построение сетки на поверхности Земли.

### 8. Релятивистские поправки

Уравнение движения в общей теории относительности. Уравнение движения в околоземном пространстве. Сведение уравнений движения к закону Ньютона с поправкой.

## Семестр: 6 (Весенний)

### 9. Явные одношаговые методы решения задачи движения

Методы Рунге-Кутты. Условия порядка, Барьер Бутчера. Экстраполяция Ричардсона, способ оценки ошибки и выбора шага. Алгоритм Реализации классического метода Рунге-Кутты. Вложенные методы. Методы Дорманда-Принца, методы Рунге-Кутты-Фелберга. Алгоритм реализации вложенных методов.

### 10. Многошаговые методы решения задачи движения

Методы Адамса-Башфорта, методы Адамса-Мультона, схема предиктор-корректор. Формулы дифференцирования назад. Аппроксимация и устойчивость многошаговых методов. Барьер Далквиста. Методы Гира, как пример формул дифференцирования назад. Метод Гаусса-Джексона как пример метода предиктор-корректор. Алгоритмы для реализации.

#### 11. Неявные методы Рунге-Кутты. Коллокационные методы

Способы решения систем нелинейных уравнений. Метод простой итерации, метод Гаусса-Зейделя, метод SOR и SSOR. Коллокационные методы. Коллокационный многочлен, эквивалентность коллокационных методов и неявных методов Рунге-Кутты. Порядок коллокационных методов.

#### 12. Методы Гаусса. Интегратор Эверхарта

Разбиения Гаусса-Лежандра, Радо и Лобатто. Порядок аппроксимация методов Гаусса на этих разбиениях. Интегратор Эверхарта как пример реализации методов Гаусса. Способ оценки шага для метода Эверхарта.

#### 13. Интерполяция баллистической траектории. Dense-output

Интерполяционные полиномы Лежандра, Ньютона и Эрмита. Интерполяция Кеплеровых орбит. Dense-output для различных методов.

#### 14. Задача определения орбиты по измерениям. Методы оптимизации

Метод наименьших квадратов. Безградиентные методы минимизация. Метод Нелдера-Мита, Метод Хука-Дживса, метод роя частиц, Байесовская оптимизация. Градиентные методы. Градиентный спуск, правила выбора шага. Метод сопряженных градиентов. Метод Ньютона и квазиньютоновские методы. Поиск начального приближения, задача Ламберта, метод Гаусса.

#### 15. Замена координат интегрирования

Кеплеровы Элементы, уравнение движения в Кеплеровых элементах, вырожденность Кеплеровых элементов. Модифицированные равноденственные элементы, идеальные элементы, запись уравнения движения.

#### 16. Задача маневрирования

Импульсные и непрерывные маневры. Маневр по смене наклонения, и долготы восходящего узла, маневрирование в плоскости, маневр встречи.

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

Компьютерная аудитория, проектор, доска.

### **6.Перечень рекомендуемой литературы**

#### Основная литература

1. Практические занятия по вычислительной математике в МФТИ [Текст]. Ч. 1 : учеб. пособие для вузов / Е. Н. Аристова, Н. А. Завьялова, А. И. Лобанов ; М-во образования РФ, Моск. физ.-техн. ин-т (гос. ун-т) .— М. : МФТИ, 2014 .— 243 с.
2. Практические занятия по вычислительной математике в МФТИ [Текст]. Ч. 2 : учеб. пособие для вузов / Е. Н. Аристова, А. И. Лобанов ; М-во образования РФ, Моск. физ.-техн. ин-т (гос. ун-т) .— М. : МФТИ, 2015 .— 310 с.

Литература из фонда кафедры:

1. Авдюшев В. А. и др. Численное моделирование орбит. – 2010.
2. Бордовицына Т. В., Авдюшев В. А. Теория движения искусственных спутников Земли //Томск: Изд-во Том. ун-та. – 2007.

Дополнительная литература

1. Лекции по вычислительной математике [Текст] / И. Б. Петров, А. И. Лобанов - М.БИНОМ. Лаб. знаний ; Интернет-Университет Информационных Технологий, 2017

Литература из фонда кафедры:

1. Гасников А.В. Современные численные методы оптимизации. Метод универсального градиентного спуска. – М.: МФТИ, 2018. - 241 с. 2-е изд

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

- <http://lib.mipt.ru/> – электронная библиотека Физтеха
- <http://www.edu.ru> – федеральный портал «Российское образование»
- <http://elibrary.ru> –электронная библиотека

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

C++, Python, интернет-ресурсы

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

В ходе лабораторных работ и домашних заданий (самостоятельной работы) студент совершенствует способность создания программного кода, а также закрепляет теоретические знания.

Лабораторные работы включают в себя изучение, реализацию и исследование алгоритмов.

Самостоятельная работа включает в себя:

- ознакомление с актуальной научной литературой;
- решение задач при выполнении домашних заданий;
- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала (по конспектам, учебной литературе).

Руководство и контроль за самостоятельной работой студента осуществляет преподаватель путем проверки домашних заданий и проведения индивидуальных консультаций.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Техническая физика
<b>профиль подготовки:</b>	Техническая физика космических летательных аппаратов Физтех-школа Аэрокосмических Технологий центр образовательных программ ФАКТ
<b>курс:</b>	<u>3</u>
<b>квалификация:</b>	бакалавр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

5 (осенний) - Дифференцированный зачет

6 (весенний) - Экзамен

**Разработчики:**

А.А. Кузнецов, преподаватель

И.И. Фукин, ассистент

Н.А. Завьялова, канд. физ.-мат. наук

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Способен использовать фундаментальные законы природы и основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности	ОПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями и законами современных естественнонаучных дисциплин в сфере своей профессиональной деятельности
	ОПК-1.2 Использует необходимые физические законы и понимает границы их применимости
ОПК-2 Способен применять методы математического анализа, математического моделирования и оптимизации для решения задач, возникающих в ходе профессиональной деятельности	ОПК-2.1 Знаком с основными методами математического анализа, математического моделирования и оптимизации
	ОПК-2.2 Способен строить математические модели, производить количественные расчеты и оценки
	ОПК-2.3 Способен определять границы применимости полученных результатов

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Введение в баллистику» обучающийся должен:

### знать:

- физические основы моделирования движения тела в околоземном пространстве;
- математические основы моделирования движения тела в околоземном пространстве;
- основные алгоритмические подходы для моделирования движения тела в околоземном пространстве;
- оценивать сложность алгоритмов для моделирования движения тел в околоземном пространстве.

### уметь:

- выбирать ту или иную физическую модель в зависимости от необходимой точности для решения задачи движения тела в околоземном пространстве;
- выбирать ту или иную математическую модель в зависимости от необходимой точности для решения задачи движения тела в околоземном пространстве.

### владеть:

- теоретическим и понятийным аппаратом, используемым в науках, связанных с моделированием движения тела в околоземном пространстве.

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

Текущий контроль проводится в период аудиторной и самостоятельной работы студентов в установленные сроки согласно расписанию.

- оценка ответов на вопросы в процессе краткого (до 5 мин) выборочного устного опроса перед началом каждого занятия по материалам предыдущего занятия;
- оценка умения решать типовые примеры и/или задачи, рассматриваемые на занятиях;
- оценка активности и ответов на вопросы в соответствии с программой занятий.

Обучающийся должен проявить всестороннее, систематическое и глубокое знание учебно-программного материала, умение свободно выполнять задания, предусмотренные программой, усвоить основную литературу и быть знакомым с дополнительной литературой, рекомендованной программой дисциплины, усвоить взаимосвязь основных понятий дисциплины, решать предложенные преподавателем задачи.

Вопросы для самостоятельной работы:

1. Реализация универсального класса времени на языке C++. Осуществление работы модуля в разных записях времени и разных шкалах с возможностью конвертации. Тестирование написанного кода и проверка результатов.



2. Реализация класса с системами координат на языке C++ с функционалом их конвертации друг в друга. Тестирование написанного кода и проверка результатов.
3. Реализация метода для работы с эфемеридами с целью нахождения положений небесных тел. Тестирование написанного кода и проверка результатов.
4. Реализация гравитационного поля Земли как реального тела с учетом других небесных тел. Тестирование написанного кода и проверка результатов.
5. Реализация модели атмосферы Земли на основе модели ГОСТ. Тестирование написанного кода и проверка результатов.
6. Реализация аэродинамического сопротивления планеты на базе написанной в задании № 5 модели атмосферы. Рассмотрение различных режимов течения и способов моделирования. Тестирование написанного кода и проверка результатов.
7. Реализация солнечного давления при помощи метода панелей. Тестирование написанного кода и проверка результатов.
8. Реализация модели давления отраженного света от Земли по закону Ламберта. Тестирование написанного кода и проверка результатов.
9. Реализация класса явных одношаговых методов Рунге-Кутты с постоянным и переменным шагом интегрирования. Осуществление возможности интерполяции траектории, маневрирования и расчета в модифицированных равноденственных элементах. Тестирование и проверка методов на аппроксимацию.
10. Реализация класса вложенных методов с постоянным и переменным шагом интегрирования. Осуществление возможности интерполяции траектории, маневрирования и расчета в модифицированных равноденственных элементах. Тестирование и проверка методов на аппроксимацию.
11. Реализация метода Эверхарта на разбиении Гаусса-Радо с постоянным и переменным шагом интегрирования. Осуществление возможности интерполяции траектории, маневрирования и расчета в модифицированных равноденственных элементах. Тестирование и проверка методов на аппроксимацию.
12. Решение обратной задачи движения по данным измерениям с помощью предложенных методов оптимизации на языке C++.

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

Примеры вопросов для дифференцированного зачета:

1. Описать различия между календарями и шкалами времени. Выписать формулы их конвертации.
2. Рассказать об используемых гравитационных моделях Земли.
3. Описать Гауссов ряд и полиномы Лежандра, а также показать их свойства.
4. Вывести формулы, описывающие различные режимы течения газа.
5. Рассказать о подходах к моделированию аэродинамического сопротивления.
6. Описать принципы моделирования давления отраженного света от Земли и ее излучения.
7. Статические и динамические модели атмосферы
8. Моделирование солнечного давления при помощи метода панелей и трассировки лучей.
9. Модели абсолютно чёрного тела, серого тела.
10. Уравнения движения и релятивистские поправки.

Примеры вопросов к экзаменам:

1. Рассказать об используемых на практике методах интегрирования систем ОДУ. Описать их отличительные характеристики, достоинства и недостатки.
2. Неявные методы Рунге-Кутты.
3. Показать эквивалентность коллокационных методов и неявных.
4. Методы Гаусса и их особенности.
5. Описать принцип работы метода интегрирования Эверхарта и вывести все сопутствующие формулы.

6. Описать алгоритм работы метода Нелдера-Мида и рассказать об областях его применения.
7. Рассказать о типах маневрирования космического аппарата, описать способы их моделирования.
8. Задача определения орбиты по измерениям.
9. Кеплеровы элементы и их использование в уравнениях движения.
10. Виды задач маневрирования и основные способы их решения.

Пример экзаменационных билетов для сдачи экзамена:

Билет №1

1. Описать принцип работы метода интегрирования Эверхарта.
2. Решение обратной задачи движения по данным измерениям с помощью предложенных методов оптимизации на языке C++.

Билет №2

1. Методы Гаусса и их особенности.
2. Уравнение движения в общей теории относительности.

Критерии оценивания

оценка «отлично (10)» выставляется студенту, показавшему систематизированные, знания учебной программы дисциплины при выполнении домашних заданий и ответе на вопросы по программе дисциплины;

оценка «отлично (9)» выставляется студенту, показавшему систематизированные, знания учебной программы дисциплины при выполнении домашних заданий и ответе на вопросы по программе дисциплины;

оценка «отлично (8)» выставляется студенту, показавшему систематизированные, знания учебной программы дисциплины при выполнении домашних заданий и ответе на вопросы по программе дисциплины, но допускает при этом небольшие неточности;

оценка «хорошо (7)» выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, демонстрирует умение применять полученные знания на практике при выполнении домашних заданий, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности;

оценка «хорошо (6)» выставляется студенту, если он знает материал экзаменационного билета, по существу излагает его, демонстрирует умение применять полученные знания на практике при выполнении домашних заданий, но допускает в ответе или в решении задач много неточностей;

оценка «хорошо (5)» выставляется студенту, если он знает материал экзаменационного билета, излагает его, демонстрирует умение применять полученные знания на практике при выполнении домашних заданий, не допускает в ответе грубых ошибок;

оценка «удовлетворительно (4)» выставляется студенту, если во время ответа, при выполнении домашних заданий 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, если во время ответа, при выполнении домашних заданий 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, если во время ответа 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 практических задач или не выполнил какое-либо из домашних заданий.

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

При проведении устного дифференцированного зачёта обучающемуся выдается билет и предоставляется 60 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету не должен превышать двух астрономических часов. Во время проведения дифференцированного зачёта при подготовке ответов на билеты, обучающиеся могут пользоваться только программой дисциплины.

При проведении экзамена обучающемуся предоставляется 60 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету на устном экзамене не должен превышать двух астрономических часов. Во время проведения экзамена при подготовке ответов на билеты, обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины, конспектами лекций и любой другой литературой.

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