

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

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор института-заместитель  
директора ФАКТ**

**М.А. Кудров**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Компьютерное моделирование задач механики полета
<b>по направлению:</b>	Информатика и вычислительная техника
<b>профиль подготовки:</b>	Программная инженерия передовая инженерная школа радиолокации, радионавигации и программной инженерии кафедра аэрофизического и летного эксперимента
<b>курс:</b>	4
<b>квалификация:</b>	бакалавр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

7 (осенний) - Дифференцированный зачет

8 (весенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 0 час.

семинары: 60 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 30 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: Ю.А. Завершнев, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

Программа обсуждена на заседании кафедры аэрофизического и летного эксперимента 05.04.2023

## Аннотация

В предлагаемой дисциплине рассматривается применение компьютерных технологий для моделирования полета ЛА в окружающей среде и КА в космическом пространстве. На лекционных занятиях излагаются основные сведения по математическим методам и системам компьютерного моделирования, необходимые для практической работы в компьютерном классе. Этот материал не дублирует основные институтские курсы. При обучении используются прототипы – реальные объекты авиационной и космической техники. В текущем году это самолет ИЛ-76Т и АЛС 'Луна – 3'.

При работе в компьютерном классе принята следующая методика: в начале выполняется тренировочная работа с полным предоставлением студентам всех компьютерных программ, затем они делают самостоятельные работы по индивидуальным заданиям. Задачи несколько упрощены с тем, чтобы можно было уложиться в отведенное учебное время.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

- изучение основ моделирования на ПЭВМ движения авиационных и ракетно-космических летательных аппаратов.

### Задачи дисциплины

- освоение студентами базовых знаний в области математического моделирования;
- приобретение навыков работы на ПЭВМ при моделировании полета ЛА;
- оказание помощи студентам в проведении собственных разработок преддипломного характера.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-2 Способен использовать современные информационные технологии и программные средства при решении задач профессиональной деятельности, соблюдая требования информационной безопасности	ОПК-2.1 Способен применять современные вычислительную технику и сервисы сети Интернет в области (сфере) профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Знает и умеет применять численные математические методы и прикладное программное обеспечение для решения научных задач в профессиональной области
	ОПК-2.3 Знает основные требования информационной безопасности
ОПК-4 Способен осуществлять сбор и обработку научно-технической и (или) технологической информации для решения фундаментальных и прикладных задач	ОПК-4.1 Владеет методами научного поиска и интеллектуального анализа информации при решении задач профессиональной деятельности
	ОПК-4.2 Знает основные источники научно-технической и (или) технологической информации в области профессиональной деятельности
	ОПК-4.3 Умеет составлять аннотации, рефераты, библиографические перечни и обзоры информации в области своей профессиональной деятельности
	ОПК-4.4 Владеет навыками работы с компьютером и компьютерными сетями с целью получения, хранения и обработки научной (технической, технологической) информации

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

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны знать:

- ☐ фундаментальные понятия, законы, теории классической и современной физики;
- ☐ порядки численных величин, характерные для различных разделов физики;
- ☐ современные проблемы физики, математики;
- ☐ современное положение дел в разработке авиационной техники;
- ☐ экспериментальные основы исследований полета ЛА с точки зрения моделирования соответствующих задач на ЭВМ.

уметь:

- ☐ абстрагироваться от несущественного при моделировании реальных физических ситуаций;
- ☐ пользоваться своими знаниями для решения фундаментальных и прикладных задач и технологических задач;
- ☐ делать правильные выводы из сопоставления результатов теории и эксперимента;
- ☐ производить численные оценки по порядку величины;
- ☐ делать качественные выводы при переходе к предельным условиям в изучаемых проблемах;
- ☐ видеть в технических задачах физическое содержание;
- ☐ осваивать новые предметные области, теоретические подходы и экспериментальные методики;
- ☐ эффективно использовать информационные технологии и компьютерную технику для достижения необходимых теоретических и прикладных результатов.

владеть:

- ☐ навыками освоения большого объема информации;
- ☐ культурой постановки и моделирования физических задач;
- ☐ навыками грамотной обработки результатов опыта и сопоставления с теоретическими данными;
- ☐ практикой исследования и решения теоретических и прикладных задач;
- ☐ навыками применения ПЭВМ при моделировании задач механики полета.

#### 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	Введение		5		3
2	Моделирование полета ЛА в окружающей среде		5		2
3	Частные случаи полета, преобразование общих уравнений		5		3
4	Системы компьютерного моделирования MatLab и Mathcad		5		2
5	Математические средства, необходимые для моделирования		5		3
6	Моделирование в компьютерном классе управляемого полета ЛА		5		2
7	Силы и моменты гравитационного происхождения		10		5
8	Общие сведения о моделировании движения КА		10		5
9	Моделирование в компьютерном классе облета Луны		10		5
Итого часов			60		30
Подготовка к экзамену		0 час.			

Общая трудоёмкость	90 час., 2 зач.ед.
--------------------	--------------------

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

Семестр: 7 (Осенний)

##### 1. Введение

Моделирование – метод изучения систем и процессов. Физическое и математическое моделирование.

Примеры моделирования в науке и технике :

- моделирование при создании первых ЭВМ;
- моделирование при осуществлении первого ядерного взрыва;
- моделирование в авиации и космонавтике.

Компьютерные системы для моделирования сложных систем. Роль теоретических моделей и входных экспериментальных данных.

##### 2. Моделирование полета ЛА в окружающей среде

Система аэродинамических коэффициентов и параметров силовой установки ЛА. П – теорема. Парадокс закона:

$$X_a = c_{xa} \cdot q \cdot S_{ref} \text{ (при } c_{xa} = \text{const) .}$$

Международная стандартная атмосфера.

Модель Земли, принимаемая при моделировании (плоская не вращающаяся, WGS – 84, ПЗ – 90).

Первичные эталоны времени и длины, вторичные эталоны, концевые меры длины.

Общие уравнения полета ЛА в атмосфере с ветром.

Особенности движения беспилотных ЛА.

Быстрые и медленные переменные, степень жесткости системы уравнений.

##### 3. Частные случаи полета, преобразование общих уравнений

Горизонтальный установившийся полет, диаграмма тяг Жуковского. Наивыгоднейший и крейсерский режимы полета.

Правильный разворот, геометрические и скоростные углы ориентации.

Полет с горизонтальным ветром, изменяющимся с высотой, оценки ИКАО.

Продольное движение в атмосфере без ветра.

Пространственный разворот в атмосфере без ветра.

##### 4. Системы компьютерного моделирования MatLab и Mathcad

Ядро MatLab и Mathcad , общие сведения. Возможности системы объектно – ориентированного

графического моделирования GUI (MatLab).

Имитация движения силуэта ЛА, 2 – D и 3 – D варианты.

Числовой и символический режимы работы.

##### 5. Математические средства, необходимые для моделирования

Сплайн – представление комплекса аэродинамических коэффициентов и параметров силовой установки:

- недостатки классической многочленной интерполяции табличных данных, теоремы Рунге и Бернштейна;

- определение сплайнов, основные свойства кубических полиномиальных сплайнов;
- сплайны в MatLab и Mathcad.

Численное интегрирование систем обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ):

- не жесткие и жесткие системы, использование якобиана;
- 'решатели ОДУ' в MatLab и Mathcad.

## 6. Моделирование в компьютерном классе управляемого полета ЛА

Имитация управления осуществляется кнопками типа pushbutton (ввиду отсутствия joystick в компьютерном классе).

Выполнение в компьютерном классе индивидуальных заданий по моделированию управляемого пространственного разворота ЛА средствами GUI.

Добавить управляющую кнопку по крену и кнопки типа pushbutton / radiobutton / togglebutton для выполнения дополнительных действий.

Семестр: 8 (Весенний)

## 7. Силы и моменты гравитационного происхождения

Гравитационный маневр, его использование в космонавтике (АЛС 'Луна – 3', КА 'Мессенджер' к Меркурию).

Тренировочная работа в компьютерном классе по моделированию облета Луны средствами Mathcad. Сравнение с опубликованными данными.

## 8. Общие сведения о моделировании движения КА

Имитация характерных режимов полета с помощью разработанной моделирующей программы (сбалансированный полет, дача руля высоты и др.)

## 9. Моделирование в компьютерном классе облета Луны

Первоначальное занятие по изучению особенностей компьютерных вычислений.

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

учебная аудитория, компьютерный класс с установленными на ЭВМ системами MatLab, Simulink и MathCad.

## 6. Перечень рекомендуемой литературы

### Основная литература

- 12 лекций по вычислительной математике : (вводный курс) [Текст] : учеб. пособие для вузов / В. И. Косарев ; Моск. физико-техн. ин-т (гос. ун-т) .— 2-е изд., испр. и доп. — М. : МФТИ, 2000 .— 224 с.
- Компьютерное моделирование задач механики полета [Текст] : учеб. пособие для вузов / Ю. А. Завершневу ; М-во образования и науки РФ, Моск. физ.-техн. ин-т (гос. ун-т), Летно-исслед. ин-т им. М. М. Громова .— М. : МФТИ, 2013 .— Ч. 1 : Введение в математические методы. - 2013. - 218 с.
- Механика полета [Текст]. Т. 1/А. Миеле, -М., Наука, 1965
- Динамика полета [Текст] : уч. для вузов / под ред. А. М. Мхитаряна .— 2-е изд., перераб. т доп. — М. : Машиностроение, 1978 .— 424 с.
- MATLAB [Текст] / В. П. Дьяконов - М. ДМК Пресс, 2014

#### Дополнительная литература

1. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Нежесткие задачи [Текст] / Э. Хайрер, С. Нерсетт, Г. Ваннер ; пер. с англ. И. А. Кульчицкой и С. С. Филиппова ; под ред. С. С. Филиппова - М. Мир, 1990
2. Безошибочные вычисления [Текст] , Методы и приложения/Р. Грегори, Е. Кришнамурти , -М., Мир, 1988
3. Аэродинамика самолета [Текст] : учебник для вузов / И. В. Остославский .— М. : Оборонгиз, 1957 .— 560 с.

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

Не используются

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

программные комплексы и моделирующие системы MatLab, Simulink, MathCad.

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

Студент, изучающий курс «Компьютерное моделирование задач механики полета», должен с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике.

В результате изучения дисциплины студент должен знать фундаментальные понятия, законы, теории классической и современной физики; порядки численных величин, характерные для различных разделов физики; современные проблемы физики, математики; современное положение дел в разработке авиационной техники.

Успешное освоение курса требует напряжённой самостоятельной работы студента. В программе курса приведено минимально необходимое время для работы студента над темой.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение и конспектирование рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала (по распечаткам моделирующих программ, учебной и научной литературе), подготовку ответов на вопросы, предназначенные для самостоятельного изучения.

Руководство и контроль за самостоятельной работой студента осуществляется в форме индивидуальных консультаций.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Информатика и вычислительная техника
<b>профиль подготовки:</b>	Программная инженерия передовая инженерная школа радиолокации, радионавигации и программной инженерии кафедра аэрофизического и летного эксперимента
<b>курс:</b>	<u>4</u>
<b>квалификация:</b>	бакалавр
Семестры, формы промежуточной аттестации:	
	7 (осенний) - Дифференцированный зачет
	8 (весенний) - Дифференцированный зачет
<b>Разработчик:</b>	Ю.А. Завершневу, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-2 Способен использовать современные информационные технологии и программные средства при решении задач профессиональной деятельности, соблюдая требования информационной безопасности	ОПК-2.1 Способен применять современные вычислительную технику и сервисы сети Интернет в области (сфере) профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Знает и умеет применять численные математические методы и прикладное программное обеспечение для решения научных задач в профессиональной области
	ОПК-2.3 Знает основные требования информационной безопасности
ОПК-4 Способен осуществлять сбор и обработку научно-технической и (или) технологической информации для решения фундаментальных и прикладных задач	ОПК-4.1 Владеет методами научного поиска и интеллектуального анализа информации при решении задач профессиональной деятельности
	ОПК-4.2 Знает основные источники научно-технической и (или) технологической информации в области профессиональной деятельности
	ОПК-4.3 Умеет составлять аннотации, рефераты, библиографические перечни и обзоры информации в области своей профессиональной деятельности
	ОПК-4.4 Владеет навыками работы с компьютером и компьютерными сетями с целью получения, хранения и обработки научной (технической, технологической) информации

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Компьютерное моделирование задач механики полета » обучающийся должен:

### знать:

- ☐ фундаментальные понятия, законы, теории классической и современной физики;
- ☐ порядки численных величин, характерные для различных разделов физики;
- ☐ современные проблемы физики, математики;
- ☐ современное положение дел в разработке авиационной техники;
- ☐ экспериментальные основы исследований полета ЛА с точки зрения моделирования соответствующих задач на ЭВМ.

### уметь:

- ☐ абстрагироваться от несущественного при моделировании реальных физических ситуаций;
- ☐ пользоваться своими знаниями для решения фундаментальных и прикладных задач и технологических задач;
- ☐ делать правильные выводы из сопоставления результатов теории и эксперимента;
- ☐ производить численные оценки по порядку величины;
- ☐ делать качественные выводы при переходе к предельным условиям в изучаемых проблемах;
- ☐ видеть в технических задачах физическое содержание;
- ☐ осваивать новые предметные области, теоретические подходы и экспериментальные методики;
- ☐ эффективно использовать информационные технологии и компьютерную технику для достижения необходимых теоретических и прикладных результатов.

### владеть:

- ☐ навыками освоения большого объема информации;
- ☐ культурой постановки и моделирования физических задач;
- ☐ навыками грамотной обработки результатов опыта и сопоставления с теоретическими данными;
- ☐ практикой исследования и решения теоретических и прикладных задач;
- ☐ навыками применения ПЭВМ при моделировании задач механики полета.



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

Примеры задач к дифференцированному зачету, семестр 7.

Получить зависимость геометрических углов ориентации самолета от скоростных при не равных нулю углах атаки и скольжения.

Получить зависимость скоростных углов ориентации самолета от геометрических при не равных нулю углах атаки и скольжения.

Записать кинематические соотношения:

$$\dot{x} = V \cos(\Theta) \cos(\Psi)$$

$$\dot{y} = V \sin(\Theta)$$

$$\dot{z} = -V \cos(\Theta) \sin(\Psi)$$

по рекомендации ИКАО в системе WGS – 84.

Примеры дополнительных вопросов, семестр 7.

При снижении внешнего давления на 235 мм рт. ст. по сравнению с нормальным 760 мм рт. ст. пассажирам самолета необходимо применить кислородные приборы. К 2027 г. в Дубае

планируется построить 400-этажное здание высотой 2400 м.

Потребуется ли подкачка воздуха на верхних этажах ?.

Почему при разработке международной стандартной атмосферы использована геопотенциальная высота вместо геометрической ?

Объяснить парадокс закона  $X_a = c_{(x_a)} q S_{ref}$  при  $c_{x_a} = \text{const}$ .

Примеры задач к зачету, семестр 8.

Вывести формулу для гравитационного давления  $P(r)$  внутри однородного шара, имеющего плотность  $\rho$  и радиус  $R$ . Оценку выполнить для центра шара при параметрах, характерных для

Земли  $\rho = \rho_{cp} = 5.5 \text{ г/см}^3$ ,  $R = 3671 \text{ км}$ . Ответ записать в атм.

Записать уравнение поверхности, для точек которой сила притяжения  $F_1$  к массе  $M_1$  в  $k$  раз больше силы притяжения  $F_2$  массой  $M_2$  :  $F_1/F_2 = k = \text{const}$ . Для системы (Земля – Луна – пробное

тело) построить (например, средствами Mathcad) указанные по-поверхности при  $k = 500, 300, 10, 2, 1, 1/2$ . Поверхность равных притяжений  $k = 1$  выделить и для сравнения показать сферу действия

Луны. Принять  $R_{12} = 384400 \text{ км}$ ,  $M_1/M_2 = 81.3$ .

Непосредственным вычислением соответствующего интеграла рассчитать силу притяжения  $F$  двух стержней длинами  $L_1$  и  $L_2$  и линейными плотностями  $M_1/L_1, M_2/L_2$  .)

Стержни располагаются

вдоль одной прямой, расстояние между их торцами равно  $d$ .

Подтвердить, что при  $d \rightarrow 0$  имеем  $F \rightarrow \infty$ . Объяснить парадокс.

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

1. Безразмерные формы определяющих уравнений, П-теорема.
2. Современное определение основных единиц измерения системы СИ.
3. Моделирование в АДТ и при полете СЛМ. Критерии подобия  $Re$ ,  $M$ ,  $Fr$ ,  $Sh$  и др.
4. Обеспечение подобия по числам  $Re$  и  $M$ , невозможность подобия по числам  $Fr$  и  $Re$ ,  $M$  одновременно.
5. Системы счисления, использовавшиеся при работе с вычислительной техникой. Пример представления числа 6356,766 км (радиус Земли в ГОСТ 4401-81) в указанных системах.
6. Понятие объекта в системе GUI MatLab. Чтение свойств объекта с заданным указателем (handle).
7. Получение полного перечня возможных свойств объекта в системе GUI MathLab.
8. Пример оформления программного модуля по свойству Callback.

9. Параметры Международной Стандартной Атмосферы. Оценить массу воздуха, находящуюся в тропосфере над плечами человека.
10. Пример представления с помощью кубического сплайна аэродинамической характеристики, заданной в табличной форме.
11. "Теорема Пифагора" для сплайнов. Экстремальное свойство.
12. Механическая интерпретация кубического интерполяционного сплайна.
13. Применение сплайнов для дифференцирования табличных данных.
14. Алгоритм построения интерполяционного кубического сплайна.
15. Алгоритм построения сглаживающего кубического сплайна.
16. Признаки "жесткости" в задаче моделирования движения самолета.

Структура билета к дифференцированному зачету,

1. Демонстрация в компьютерном классе моделирования полета ЛА по выбранному индивидуальному заданию.
2. Объяснение решения выбранной задачи к зачету.
3. Ответ на дополнительный вопрос.

#### Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

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

Во время проведения дифференцированного зачета обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины, а также справочной литературой, вычислительной техникой, конспектами лекций.

Дифференцированный зачет может проводиться по итогам текущей успеваемости и сдачи заданий, или путем организации специального опроса, проводимого в устной форме.