

**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>	Системы автоматизированного проектирования авиационных двигателей
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Авиационные технологии Физтех-школа авиационных и цифровых технологий кафедра силовых установок
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

2 (весенний) - Дифференцированный зачет

3 (осенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 15 час.

семинары: 45 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 30 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: Ю.М. Темис, д-р техн. наук, старший научный сотрудник

Программа обсуждена на заседании кафедры силовых установок 20.03.2024

## Аннотация

Программа курса "Системы автоматизированного проектирования авиационных двигателей" сформирована для формирования у студентов базовых знаний в области САПР АД, геометрического моделирования, МКЭ, оптимального проектирования, приобретения теоретических знаний в области описания и моделирования конструкций деталей и узлов ГТД, приобретения теоретических знаний и практического опыта при решении задач междисциплинарного математического моделирования.

### 1. Цели и задачи

#### Цель дисциплины

- знакомство студентов с принципами создания современных систем автоматизированного проектирования авиационных двигателей, методами оптимального проектирования, методами междисциплинарного математического моделирования деталей и узлов авиационных двигателей.

#### Задачи дисциплины

- формирование у студентов базовых знаний в области САПР АД, геометрического моделирования, МКЭ, оптимального проектирования;
- приобретение теоретических знаний в области описания и моделирования конструкций деталей и узлов ГТД;
- приобретение теоретических знаний и практического опыта при решении задач междисциплинарного математического моделирования.

### 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели

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

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- фундаментальные понятия, принципы, методы создания и использования систем автоматического проектирования;
- теорию метода конечных элементов;
- методы геометрического моделирования и автоматизированного черчения.

уметь:

- абстрагироваться от несущественного при моделировании реальных конструкций
- уметь использовать арсенал механики жидкости и газа при разработке моделей конструктивных элементов и механики деформирования твердого тела.

владеть:

- навыками применения систем автоматизированного проектирования;
- методами разработки элементов систем автоматизированного проектирования;
- методами постановки и решения задач междисциплинарного математического моделирования рабочих процессов в деталях и узлах АД;
- методами постановки и решения задач оптимального проектирования деталей и узлов ГТД.

#### 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	Общие вопросы организации систем автоматизированного проектирования	5	5		5
2	Принципы автоматизированного проектирования	5	5		5
3	Геометрическое моделирование	5	5		5
4	Методы создания математических моделей. Основы МКЭ и МГЭ в задачах математической физики		10		5
5	Методы и модели междисциплинарного моделирования		10		5
6	Основы оптимального проектирования конструкций		10		5
Итого часов		15	45		30
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

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

Семестр: 2 (Весенний)

#### 1. Общие вопросы организации систем автоматизированного проектирования

##### 1.1 Введение

- Роль автоматизации проектирования в современном машиностроении
- Принципы организации систем автоматизированного проектирования
- Понятие жизненного цикла изделия
- Информационное поле, обеспечивающее работу САПР

##### 1.2 Математические модели в САПР

- Геометрические модели
- Модели отклика системы
- Модели оценки качества проекта
- принцип иерархии моделей

##### 1.3 Структура программного обеспечения САПР

- Базовое программное обеспечение
- Прикладное программное обеспечение
- Универсальное программное обеспечение
- Специализированное программное обеспечение
- Структура рабочего места конструктора

## 2. Принципы автоматизированного проектирования

### 2.1 Этапы проектирования

- Техническое задание
- Эскизное проектирование
- Рабочее проектирование

### 2.2 Принципы проектирования

- Области дивергенции, трансформации и конвергенции
- Структурирование конструкции на различных этапах проектирования
- Граф модель проекта
- Программы управления процессом проектирования
- Требования к математическим моделям, применяемым в различных областях проектирования
- Объемы информации для разных этапов проектирования
- 

### 2.3 Критерии качества проекта

- Критерий функциональности
- Критерий стоимости
- Критерий ресурса и надежности
- Модульность конструкции
- Критерии адекватности математических моделей реальной конструкции
- Понятие коэффициента запаса
- Критерий слабого звена, примеры применения
- Критерий предельного состояния, примеры применения

Критерий равнопрочности

## 3. Геометрическое моделирование

### 3.1 Геометрические модели

- Требования к системам геометрического моделирования
- Эрмитовы кубические сплайны
- Формы представления сплайнов, сплайны  $\phi$  форме Безье
- Модели представления поверхностей
- Модели представления объемов
- Каркасные и оболочечные модели
- 

### 3.2 Принципы организации информационной поддержки систем геометрического моделирования

- Способы представления графической информации в цифровом виде
- Стандарты передачи информации об объектах
- Структура баз данных, реляционные системы управления и хранения информации

### 3.3 Методы построения сеток

- Требования к качеству сеток
- Регулярные сетки
- Улучшение качества регулярных сеток
- Нерегулярные сетки
- Принцип Делоне

- Алгоритмы статической и динамической триангуляризации

## Семестр: 3 (Осенний)

### 4. Методы создания математических моделей. Основы МКЭ и МГЭ в задачах математической физики

#### 4.1 Одномерные проблемы

- Обзор методов численного решения проблем математической физики с позиций теории аппроксимации. Метод Бубнова-Галеркина. Метод Ритца. Метод коллокаций. Метод подобластей.
- Метод взвешенных невязок.
- Задачи физики, теплопроводности, течения жидкости и газа, механики деформируемого тела, приводящие к одномерной проблеме Штурма-Лиувилля.
- Формулировка метода взвешенных невязок для дифференциального уравнения второго порядка.
- Понятие конечного носителя, локальные координаты, линейная аппроксимация решения на интервале.
- Вектор положения, вектор решения на интервале, матрицы жесткости элемента, вектор правых частей.
- Образование ансамбля конечных элементов. Учет простейших граничных условий.
- Учет сложных граничных условий. Метод штрафов и метод множителей Лагранжа.
- Формулировка уравнений МКЭ и процедура решения для задачи на собственные значения и нелинейные задачи.
- Полиномы Лагранжа и нелинейная аппроксимация. Особенности вычисления матриц жесткости и векторов правых частей на элементе для нелинейной аппроксимации решения. Схемы численного интегрирования Ньютона-Котеса и Гаусса-Лежандра.
- Одномерные задачи порядка выше второго. Применение полиномов Эрмита для аппроксимации решения на элементе.
- Архитектура программного комплекса МКЭ для одномерных задач.

#### 4.2 Двумерные задачи

- Обзор классов задач, приводящих к уравнению Пуассона в двумерной области.
- Метод взвешенных невязок для уравнения Пуассона.
- Треугольный элемент с линейной аппроксимацией функции.
- Барицентрические координаты.
- Матрица жесткости для треугольного элемента с линейной аппроксимацией.
- Получение ансамбля уравнений МКЭ для уравнения Пуассона в произвольной плоской области.
- Учет смешанных граничных условий.
- Методы учета сложных граничных условий. Метод штрафов и метод множителей Лагранжа.
- Архитектура программного комплекса для решения уравнения Пуассона.
- Принцип виртуальной работы для задач механики деформируемого тела.
- Физический смысл метода множителей Лагранжа.
- Двумерные задачи теории упругости.
- Матрица жесткости для треугольного конечного элемента в плоской задаче теории упругости.
- Семейство Лагранжевых и Серендиповых конечных элементов. Численное интегрирование в треугольнике и четырехугольнике.
- Архитектура программного комплекса для решения двумерных задач теории упругости.

-

#### 4.3 Трехмерные задачи

- Барицентрические координаты в тетраэдре.
- Семейство Лагранжевых и Серендиповых элементов для трехмерных задач.
- Изопараметрические конечные элементы. Преобразование координат. Якобиан преобразования координат.

- Численное интегрирование при использовании изопараметрических конечных элементов.
- Структурные конечные элементы. Конечные элементы балок, пластин и оболочек.

#### 4.4 Общие вопросы МКЭ.

- Способы оптимизации расчетных схем. Методы подконструкций и суперэлементов.
- Технология объединения в единый ансамбль конечных элементов различного типа.
- Аппроксимация и сходимость конечно-элементных схем. (Общие понятия)

### 5. Методы и модели многодисциплинарного моделирования

#### 5.1 Нелинейные задачи механики сплошной среды

- Внутреннее время нелинейной системы. Вариационный принцип для физически нелинейной проблемы на примере задач нелинейной теории упругости и деформационной теории пластичности.
- Построение шагового алгоритма по внутреннему времени системы. Коррекция погрешности шагового алгоритма. Линеаризация вариационных соотношений на шаге. Связь шаговых алгоритмов с различными модификациями метода Ньютона.
- Дискретизация задачи на основе представлений МКЭ. Секущая и касательная матрицы жесткости системы. Примеры расчета нелинейных систем.
- Оценки устойчивости и сходимости различных модификаций шагового алгоритма.
- Обзор обобщения шаговых алгоритмов для решения более сложных нелинейных задач математической физики с учетом физической и геометрической нелинейностей.

#### 5.2 МКЭ в нестационарных и динамических задачах математической физики

- Обзор типов нестационарных задач. Учет нестационарных воздействий в системе уравнений МКЭ и соответствующем вариационном соотношении или соотношении принципа взвешенных невязок. Задачи динамики. Учет нагрузок от сил инерции.
- Собственные колебания систем. Проблема собственных значений и векторов. Применение принципа Даламбера и сведение задачи на вынужденные колебания при гармоническом воздействии к решению задачи статики. Архитектура алгоритма и программы.
- Методы решения задач при произвольном характере изменения нестационарных воздействий на систему. Метод представления решения в виде разложения по собственным векторам. Архитектура алгоритма и программы.
- Прямые методы интегрирования динамических систем. Метод центральных разностей. Метод Хуболта. Метод Ньюмарка. - метод Вилсона. Оценка их эффективности.
- Постановка и методы интегрирования нестационарных задач теплопроводности и механики жидкости.

### 6. Основы оптимального проектирования конструкций

#### 6.1 Постановка задач оптимального проектирования в САПР

- Параметры проектирования
  - Вектор состояния системы
  - Ограничения
  - Функция цели
  - Примеры различных ограничений (по напряжениям, по жесткости, по размерам и т.д.)
1. Равнопрочный стержень при действии распределенной осевой нагрузки
  2. Равнопрочная лопатка компрессора
  3. Метод динамического программирования на примере задачи проектирования диска турбины.
  4. Оценки несущей способности диска
- Построение алгоритма генерации толщин диска
1. Ограниченность, полученного проекта
  2. Принцип интеграции модулей оптимизации лопатки и диска в систему проектирования колеса компрессора

#### 6.2 Метод анализа чувствительности

- Система уравнений, описывающих вектор состояния конструкции

- Ограничения на параметры проектирования и вектор состояния
- Алгоритм метода чувствительности
- Преимущества метода
- Примеры решения задач

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

аудитория, оснащенная мультимедиапроектором и экраном и оборудование отдела технического обучения ЦИАМ. Помещения и выделенное для обучения и практических занятий оборудование отдела САПР и Математического моделирования ГТД ЦИАМ.

## **6.Перечень рекомендуемой литературы**

### Основная литература

1. Введение в метод конечных элементов [Текст]/Д. Норри, Ж. Фриз , -М., Мир, 1981
2. Применение метода конечных элементов [Текст]/Л. Дж. Сегерлинд , пер. с англ. А. А. Шестакова , -М., Мир, 1979
3. Основы метода конечных элементов [Текст], монография/И. Н. Молчанов, Л. Д. Николенко , -Киев, Наукова думка, 1989

### Дополнительная литература

1. Введение в метод конечных элементов. Одномерная статическая упругость/Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Кафедра информатики и вычислительной математики ; составитель В. И. Голубев , Москва, МФТИ, 2019
2. Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред [Текст] = Finite elements of nonlinear continua/пер. с англ. А. М. Васильева , -М., Мир, 1976

## **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)**

программное обеспечение САПР и математического моделировании, используемое при проведении исследований в ЦИАМ.

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

Студент, изучающий дисциплину, 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 основные определения, понятия, аксиомы.

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 конспектам лекций, учебной и научной литературе), подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения, доказательство отдельных утверждений, свойств;
- подготовку к дифференцированному зачету.

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

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к лектору.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Авиационные технологии Физтех-школа авиационных и цифровых технологий кафедра силовых установок
<b>курс:</b>	<u>1</u>
<b>квалификация:</b>	магистр
Семестры, формы промежуточной аттестации:	
2 (весенний) - Дифференцированный зачет	
3 (осенний) - Дифференцированный зачет	
<b>Разработчик:</b>	Ю.М. Темис, д-р техн. наук, старший научный сотрудник

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Системы автоматизированного проектирования авиационных двигателей» обучающийся должен:

### знать:

- фундаментальные понятия, принципы, методы создания и использования систем автоматического проектирования;
- теорию метода конечных элементов;
- методы геометрического моделирования и автоматизированного черчения.

### уметь:

- абстрагироваться от несущественного при моделировании реальных конструкций
- уметь использовать арсенал механики жидкости и газа при разработке моделей конструктивных элементов и механики деформирования твердого тела.

### владеть:

- навыками применения систем автоматизированного проектирования;
- методами разработки элементов систем автоматизированного проектирования;
- методами постановки и решения задач междисциплинарного математического моделирования рабочих процессов в деталях и узлах АД;
- методами постановки и решения задач оптимального проектирования деталей и узлов ГТД.

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

1. Оптический пирометр для измерения распределения температуры рабочих лопаток турбины.
2. Спектральные методы диагностики потока: спектры излучения и поглощения, спектральные приборы, спектральный анализ.
3. Метод обращения спектральных линий.
4. Метод КАРС, метод лазерной индуцированной флюоресценции.
5. Термокраски для определения температур поверхности.
6. Методы измерения скорости потока.
7. Лазерный доплеровский измеритель скорости.
8. Измерение концентрации пассивной примеси.
9. Метод PIV для измерения полей скорости и турбулентности.
10. Методы измерения зазоров между лопатками рабочего колеса и корпусом в компрессоре и турбине.

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

1. Введение в технику и методику проведения эксперимента.
2. Особенности измерений в ГТД.
3. Типичные установки для испытания двигателей.
4. Основные понятия о погрешностях измерений.
5. Метрологическое обеспечение эксперимента.
6. Электрические эффекты в газодинамике и их практическое применение.
7. Особенность внешней и внутренней электризации ЛА и элементов ГТД и ее измерение.
8. Электростатическая диагностика, ее применение в стендовых и аэродромных условиях.
9. Приборы для измерения полного и статического давления, насадки для измерения направления скорости.
10. Методы измерения переменных давлений, градуировка датчиков.

##### Билет 1

Контактные средства измерения температуры: термопары, термометры сопротивления, погрешности измерений.

##### Билет 2

Оптические методы измерения температуры: оптические пирометры, градуировка пирометров и их погрешности.

#### 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.