

**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>	Силовые установки летательных аппаратов
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Беспилотные авиационные системы
	Физтех-школа авиационных и цифровых технологий
	кафедра аэрофизики и летательных аппаратов
<b>курс:</b>	4
<b>квалификация:</b>	бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 7 (осенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 0 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 60 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: Е.В. Карпов, канд. техн. наук, доцент

Программа обсуждена на заседании кафедры аэрофизики и летательных аппаратов 17.03.2020

## Аннотация

В курсе с использованием теоретических основ газовой динамики и термодинамики рассматриваются основные физические процессы и явления, протекающие в элементах авиационных силовых установок. Вводятся понятия двигателя, движителя, силовой установки. Рассматриваются законы сохранения массы, импульса, энергии применительно к течению газа в элементах силовой установки. Дается классификация двигателей по способу создания тяги, термодинамическому циклу и по конструкции. Рассматривается схема и принцип работы поршневого двигателя. Приводятся принципиальные схемы основных типов воздушно-реактивных и ракетных двигателей. Даются понятия и выводятся выражения для тяги и эффективной тяги воздушно-реактивного двигателя. Анализируется рабочий процесс и рассматриваются эксплуатационные характеристики турбореактивного двигателя - скоростные, высотные, дроссельные. Анализируется тепловой баланс турбореактивного двигателя, вводятся понятия эффективного, тягового и полного к.п.д. двигателя. В заключительной части курса рассматриваются области применения различных двигателей на летательных аппаратах.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

- ознакомить студентов с принципиальными схемами основных типов силовых установок современных и перспективных летательных аппаратов, дать необходимые знания о характеристиках и способах оценки эффективности силовых установок и их элементов, которые могут быть использованы при разработке, проектировании и создании летательных аппаратов различного назначения в конструкторских бюро, научно-исследовательских институтах и предприятиях авиационной отрасли.

Курс базируется на теоретических основах газовой динамики и термодинамики, содержит элементы теории воздушно-реактивных и поршневых двигателей.

### Задачи дисциплины

- изучение физических процессов и закономерностей, протекающих в элементах авиационной силовой установки и двигателя;
- усвоение студентами основных понятий, моделей и методик, используемых в теории авиационных двигателей;
- овладение навыками расчётной оценки и анализа термодинамических циклов авиационных двигателей различных типов, характеристик рабочего процесса, тягово-экономических и эксплуатационных характеристик воздушно-реактивных двигателей.

## 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
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики
ПК-2 Способен анализировать полученные в ходе научно-исследовательской работы данные и делать научные выводы (заключения)	ПК-2.1 Владеет методами статистической обработки и анализа научных данных

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

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны знать:

- фундаментальные понятия и законы газовой динамики, термодинамики, аэродинамики;
- основные типы авиационных и ракетных двигателей и их компоновок на летательных аппаратах различного назначения;
- принципы работы авиационных двигателей различных типов;
- физические процессы, протекающие в элементах авиационной силовой установки и двигателя;
- модели течения и уравнения, применяемые для описания движения газа в силовой установке, двигателе и их элементах;
- параметры, используемые для оценки эксплуатационных характеристик двигателя и силовой установки;
- особенности и основные методы проведения экспериментальных исследований элементов силовых установок.

уметь:

- выделять основные физические явления при построении теоретических моделей и анализе работы авиационных двигателей различных типов;
- понимать физический смысл теоретических моделей фундаментальных процессов;
- применять основные уравнения сохранения для описания физических процессов в элементах силовой установки с ВРД;
- применять метод трубки тока для вывода формулы тяги реактивного двигателя;
- проводить расчёт совершаемой газом термодинамической работы на этапах рабочего цикла ВРД и ПД;
- делать правильные выводы из сопоставления теоретических и экспериментальных результатов исследования;
- производить численные оценки по порядку величины;
- делать качественные выводы при переходе к предельным условиям в рассматриваемых проблемах;
- видеть в технических и прикладных задачах физическое содержание;
- осваивать новые предметные области, теоретические подходы и экспериментальные методики;
- эффективно использовать информационные технологии и компьютерную технику для получения необходимых теоретических и прикладных результатов.

владеть:

- навыками самостоятельного поиска необходимой информации в научно-технической литературе и Интернете;
- навыками расчётной оценки тяги силовой установки, эффективной тяги по газодинамическим параметрам потока и аэродинамическим характеристикам планера;
- техникой перевода тягово-экономических характеристик двигателя из используемых в практике технических единиц в систему СИ и наоборот;
- 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 теоретического анализа реальных задач в области аэродинамики силовых установок ЛА.

#### **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	Двигатель и силовая установка (СУ) летательного аппарата (ЛА).		4		6

2	Основные уравнения движения газа в силовой установке, двигателе и их элементах.		6		17
3	Принципиальные схемы основных типов авиационных и ракетных двигателей.		8		11
4	Рабочий процесс и эксплуатационные характеристики турбореактивного двигателя (ТРД).		8		17
5	Тяга, сопротивление, эффективная тяга, мощность.		4		9
Итого часов			30		60
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. Двигатель и силовая установка (СУ) летательного аппарата (ЛА).

Понятия СУ, двигатель, движитель. Примеры силовых установок различных типов ЛА. Составные части СУ и их назначение. Компоновки СУ на ЛА. Требования к СУ с учётом типа ЛА.

Классификация двигателей по способу создания тяги, термодинамическому циклу и по конструкции. Винтовые поршневые и реактивные двигатели. Воздушно-реактивные двигатели (ВРД) и ракетные двигатели (РД).

Двигатель как тепловая машина. Термодинамический цикл Карно. К.п.д. цикла Карно.

##### 2. Основные уравнения движения газа в силовой установке, двигателе и их элементах.

Модели течения газа. Критическая скорость. Параметры торможения. Адиабата Пуассона. Энтропия. Импульс газового потока. Газодинамические функции.

Метод элементарной струйки. Уравнение неразрывности. Уравнение теплосодержания (сохранения энергии). Энтальпия. Обобщённое уравнение Бернулли. Уравнение первого закона термодинамики.

Применение уравнений сохранения к анализу работы элементов СУ (на примере СУ с ПВРД, ТРД).

##### 3. Принципиальные схемы основных типов авиационных и ракетных двигателей.

Поршневые двигатели.

Схема и принцип работы четырёхтактного авиационного поршневого двигателя (ПД) внутреннего сгорания.

Деление ПД по типу используемого топлива (бензиновые, дизельные). Понятие о детонационной стойкости и октановом числе топлива. Степень сжатия ПД, коэффициент избытка воздуха, характеристики топливо-воздушной смеси.

Термодинамический цикл поршневого двигателя (цикл Отто) в координатах  $P, V$  и  $T, S$ . К.п.д. идеального цикла Отто.

Мощность и тяга винтомоторной группы (ВМГ). Использование нагнетателя для увеличения мощности ПД. Недостатки ПД.

Воздушно-реактивные двигатели (ВРД).

Бескомпрессорные ВРД прямой реакции: дозвуковой ПВРД, СПВРД, ГПВРД, ПуВРД.

Газотурбинные двигатели (ГТД) прямой реакции: ТРД, ТРДФ, ТРДД, ТРДДсм, ТРДДФсм.

ГТД непрямой реакции: ТВД, ТВВД, ТВад.

Ракетные двигатели: РДТТ, ЖРД. Основные характеристики (тяга, удельная тяга, удельный вес). Способы увеличения тяги ЖРД (на примере задачи о движении в пустоте ЛА с переменной массой  $m$ ).

#### 4. Рабочий процесс и эксплуатационные характеристики турбореактивного двигателя (ТРД).

Основные элементы силовой установки на основе ТРД (воздухозаборник, компрессор, камера сгорания, турбина, сопло) и их роль в рабочем цикле. ТРД с одновальным и двухвальным компрессором.

Термодинамический цикл ТРД (цикл Брайтона) в координатах  $P, V$  и  $T, S$ . Политропная работа. К.п.д. идеального цикла Брайтона.

Удельные параметры ТРД (удельная тяга  $R_{уд}$ , удельный расход топлива  $C_{уд}$ , удельная масса дв, лобовая тяга  $R_{лоб}$ ).

Эксплуатационные характеристики ТРД: скоростные, высотные, дроссельные, высотно-скоростные. Законы регулирования ТРД. Адиабатические к.п.д. компрессора и турбины. Понятие о «вырождении» ТРД.

Тепловой баланс ТРД, потери тепловой и кинетической энергии в ТРД. Эффективный (термический), тяговый и полный КПД двигателя.

Зависимость тягового к.п.д. двигателей различных типов от скорости полёта. Области применения различных двигателей на летательных аппаратах.

#### 5. Тяга, сопротивление, эффективная тяга, мощность.

Тяга реактивного двигателя (формула Стечкина).

Внешнее сопротивление элементов СУ и ЛА. Эффективная тяга силовой установки.

Мощность двигателя, единицы мощности, крутящий момент на валу.

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

учебная аудитория, оснащенная мультимедиапроектором и экраном.

### 6. Перечень рекомендуемой литературы

#### Основная литература

1. Силовые установки с поворотом вектора тяги в полете [Текст]/В. Ф. Павленко, -М., Машиностроение, 1987
2. Силовые установки летательных аппаратов с воздушно-реактивными двигателями [Текст] : учеб. пособие для вузов / В. И. Поликовский, Д. Н. Сурнов ; М-во высш. и сред. спец. образования, Моск. авиац. ин-т им. С. Орджоникидзе .— М. : Машиностроение, 1965 .— 261 с.
3. Теория авиационных двигателей [Текст]: теория лопаточных машин : учеб. для вузов; рек. Гос. ком. РФ / П. К. Казанджан, Н. Д. Тихонов; под общ. ред. П. К. Казанджана .— 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Машиностроение, 1995 .— 320 с.
1. Симонов Л.А. Силовые установки летательных аппаратов. М., Изд-во МФТИ, 1970.
2. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. М., «Наука», 1976.
3. Теория авиационных двигателей. Части 1 и 2. /Под ред. Ю.Н.Нечаева. Изд-во ВВИА им. проф. Н.Е.Жуковского, 2006.
4. Нечаев Ю.Н., Фёдоров Р.М. Теория авиационных газотурбинных двигателей. Части 1 и 2. М., «Машиностроение», 1977-78.
5. Теория воздушно-реактивных двигателей. /Под ред. С.М.Шляхтенко. М., «Машиностроение», 1975.
6. Стечкин Б.С., Казанджан П.К., Алексеев Л.П., Говоров А.Н., Нечаев Ю.Н., Фёдоров Р.М. Теория реактивных двигателей /лопаточные машины/. М., Оборонгиз, 1956.
7. Богданов А.Д., Бондаренко П.Д., Степанов Ю.А. Авиационный двигатель АШ82В. М., «Транспорт», 1974.

#### Дополнительная литература

1. Теория реактивных двигателей. Лопаточные машины [Текст] : [учеб. пособие для вузов] / Б. С. Стечкин [и др.] ; под ред. Б. С. Стечкина .— М. : Оборонгиз, 1956 .— 543 с.

1. Емин О.Н., Карасёв В.Н., Ржавин Ю.А. Лопаточные машины двигателей летательных аппаратов. М., Изд-во МАИ, 2009.

2. Александров В.Л. Воздушные винты. М., Оборонгиз, 1951.

3. Голубев В.А. Двухконтурные авиационные двигатели. М., Изд-во МАИ, 1998.

## **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)**

На практических занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций.

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

Студент, изучающий дисциплину "Силовые установки летательных аппаратов", 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 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>	Беспилотные авиационные системы Физтех-школа авиационных и цифровых технологий кафедра аэрофизики и летательных аппаратов
<b>курс:</b>	<u>4</u>
<b>квалификация:</b>	бакалавр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 7 (осенний) - Дифференцированный зачет	
<b>Разработчик:</b>	Е.В. Карпов, канд. техн. наук, доцент

## 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
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики
ПК-2 Способен анализировать полученные в ходе научно-исследовательской работы данные и делать научные выводы (заключения)	ПК-2.1 Владеет методами статистической обработки и анализа научных данных

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Силовые установки летательных аппаратов» обучающийся должен:

### знать:

- фундаментальные понятия и законы газовой динамики, термодинамики, аэродинамики;
- основные типы авиационных и ракетных двигателей и их компоновок на летательных аппаратах различного назначения;
- принципы работы авиационных двигателей различных типов;
- физические процессы, протекающие в элементах авиационной силовой установки и двигателя;
- модели течения и уравнения, применяемые для описания движения газа в силовой установке, двигателе и их элементах;
- параметры, используемые для оценки эксплуатационных характеристик двигателя и силовой установки;
- особенности и основные методы проведения экспериментальных исследований элементов силовых установок.

### уметь:

- выделять основные физические явления при построении теоретических моделей и анализе работы авиационных двигателей различных типов;
- понимать физический смысл теоретических моделей фундаментальных процессов;
- применять основные уравнения сохранения для описания физических процессов в элементах силовой установки с ВРД;
- применять метод трубки тока для вывода формулы тяги реактивного двигателя;
- проводить расчёт совершаемой газом термодинамической работы на этапах рабочего цикла ВРД и ПД;
- делать правильные выводы из сопоставления теоретических и экспериментальных результатов исследования;
- производить численные оценки по порядку величины;
- делать качественные выводы при переходе к предельным условиям в рассматриваемых проблемах;
- видеть в технических и прикладных задачах физическое содержание;
- осваивать новые предметные области, теоретические подходы и экспериментальные методики;
- эффективно использовать информационные технологии и компьютерную технику для получения необходимых теоретических и прикладных результатов.

### владеть:



навыками самостоятельного поиска необходимой информации в научно-технической литературе и Интернете;

навыками расчётной оценки тяги силовой установки, эффективной тяги по газодинамическим параметрам потока и аэродинамическим характеристикам планера;

техникой перевода тягово-экономических характеристик двигателя из используемых в практике технических единиц в систему СИ и наоборот;

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 теоретического анализа реальных задач в области аэродинамики силовых установок ЛА.

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

Текущий контроль заключается в учете посещения студентами семинаров, а также в учете тех или иных видов активности студентов на семинарах: выполнения домашних заданий, решения задач на семинаре, обсуждения возникающих вопросов по текущему материалу и т.п. Данные по текущему контролю учитываются как при выставлении оценок по дифференцированному зачету.

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

1. Что понимается под тягой воздушно-реактивного двигателя (ВРД)?
2. Какие основные элементы входят в состав силовой установки с турбореактивным двигателем (ТРД), их назначение?
3. Принципиальная схема и составные элементы ТРД, их назначение.
4. Каковы физические причины возникновения тяги в ТРД?
5. По какому термодинамическому циклу работает ТРД?
6. Как зависит к.п.д. ТРД от степени повышения давления в компрессоре?
7. Как зависит тяга ТРД от скорости полёта?
8. Влияние высоты полёта на тягу ТРД.
9. Как меняется расход воздуха и тяга ТРД по числу оборотов вала компрессора?
10. Чем обусловлено явление «вырождения» ТРД?
11. При каких скоростях полёта может эффективно работать прямоточный воздушно-реактивный двигатель (ПВРД)?
12. Какие существуют принципиальные способы увеличения тяги жидкостного ракетного двигателя (ЖРД)?
13. По какому термодинамическому циклу работает поршневой двигатель (ПД)?
14. Как зависит к.п.д. ПД от степени сжатия?
15. Какое физическое явление ограничивает степень сжатия карбюраторного ПД?

Билет 1

1. Что понимается под тягой воздушно-реактивного двигателя (ВРД)?
2. Какие основные элементы входят в состав силовой установки с турбореактивным двигателем (ТРД), их назначение?

Билет 2

1. Принципиальная схема и составные элементы ТРД, их назначение.
2. Каковы физические причины возникновения тяги в ТРД?

Билет 3

1. По какому термодинамическому циклу работает ТРД?

## 2. Как зависит к.п.д. ТРД от степени повышения давления в компрессоре?

### 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.

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