

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение  
высшего образования  
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»

«УТВЕРЖДАЮ»



Проректор по научной работе

д.т.н. проф.

Драгунов В.К.

«30»

Июня

2023 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА**  
специальной дисциплины

**2.5.15 Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки  
летательных аппаратов**

Москва 2023

Программа составлена на основе паспорта специальности научных работников и программы - минимум кандидатского экзамена по специальности 2.5.15 «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов» в действующей редакции и в соответствии с Положением о подготовке научных и научно- педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре), утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 30 ноября 2021г. № 2122.

## **ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

**Целью** является формирование компетенций (знаний, умений, навыков), необходимых для успешной научно-исследовательской деятельности в области проектирования и разработки авиационной и ракетно-космической техники, включая исследование энергетических основ, схем, параметров, рабочего процесса, характеристик и конструкций двигателей и энергетических установок летательных аппаратов различного назначения, методологии их создания, методов расчета, проектирования, испытаний, доводки, а также технологии их производства и технической эксплуатации.

**Задачами** дисциплины является изучение:

- теории и рабочих процессов тепловых двигателей летательных аппаратов, силовых и энергетических установок, их узлов и систем;
- методы конструирования тепловых двигателей, их узлов и систем, включая методы и системы автоматизированного проектирования двигателей с помощью ЭВМ;
- теоретических основ и технологических процессов изготовления деталей двигателей и агрегатов летательных аппаратов, включая технологическую подготовку и управление производством, технологические процессы и специальное оборудование для формообразования и обработки деталей двигателей, их защита;
- методов испытания двигателей, их элементов и агрегатов, системы автоматизированного сбора, обработки и анализа экспериментальных данных, включая комплексную автоматизацию стендовых испытаний;
- методов обеспечения ресурса и надежности двигателей, энергетических установок летательных аппаратов, эффективности их использования;
- процессов создания и доводки двигателей летательных аппаратов; способов улучшения характеристик и основных данных двигателей, находящихся в серийном производстве и эксплуатации;
- методов и средств диагностики технического состояния двигателей и энергетических установок летательных аппаратов, эксплуатационная технологичность;

- методов расчета термогазодинамических и теплофизических процессов в двигателях и энергосиловых установках летательных аппаратов, их элементах;
- методов расчёта, проектирования и конструирования стендовых систем и систем для модельных и натурных испытаний двигателей и энергоустановок летательных аппаратов и их элементов.

## **МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ПРОГРАММЫ АСПИРАНТУРЫ**

Специальная дисциплина в структуре программы аспирантуры входит в Блок 2 «Образовательный компонент. Общая трудоемкость составляет 7 зачетных единиц (з.е.).

### **Направления исследований:**

1. Теория и рабочий процесс тепловых двигателей летательных аппаратов, а также силовых и энергетических установок, их узлов и систем. Оптимизация схем и параметров двигателей.
2. Характеристики тепловых двигателей летательных аппаратов и их энергетических установок, отдельных узлов и систем при различных условиях их использования.
3. Источники энергии тепловых двигателей летательных аппаратов, анализ их эффективности и способов реализации энергии в цикле.
4. Методы оптимального согласования параметров и характеристик системы «силовая установка – летательный аппарат» и анализ ее эффективности.
5. Методы конструирования тепловых двигателей летательных аппаратов, их узлов и систем, включая методы и системы автоматизированного проектирования двигателей с помощью ЭВМ.
6. Строительная механика тепловых двигателей летательных аппаратов. Методы оценки и характеристики статической и усталостной прочности систем двигателей с учетом пластичности и ползучести материалов.
7. Колебания в тепловых двигателях летательных аппаратов. Резонансные явления, автоколебательные и нестационарные процессы в конструкциях двигателей. Способы борьбы с опасными вибрациями в двигателях.
8. Теоретические основы и технологические процессы изготовления деталей двигателей и агрегатов летательных аппаратов, включая технологическую подготовку и управление производством, технологические процессы и специальное оборудование для формообразования и обработки деталей двигателей, их защита.
9. Методы испытания двигателей, их элементов и агрегатов, системы автоматизированного сбора, обработки и анализа экспериментальных данных, включая комплексную автоматизацию стендовых испытаний.

10. Управление и регулирование двигателей, силовых и энергетических установок в целом, вопросы устойчивости их работы.

11. Методы обеспечения ресурса и надежности двигателей, энергетических установок летательных аппаратов, эффективности их использования.

12. Математическое моделирование рабочих процессов, характеристик, динамических процессов, рабочих состояний двигателей и энергетических установок, стадий и этапов их жизненного цикла (создания, производства, эксплуатации и утилизации).

13. Изменение свойств материалов в процессе эксплуатации, интенсивность деградации характеристик элементов, узлов и подсистем двигателей и энергосиловых установок летательных аппаратов.

14. Методы расчетов воздействия тепловых двигателей на окружающую среду и анализ путей его уменьшения.

15. Прогнозирование развития конструкции, технологии производства, формирование перспективных уровней термодинамического и эксплуатационно-технологического совершенства двигателей летательных аппаратов и их агрегатов, а также технико-экономических процессов их создания, производства и эксплуатации. Математические основы формирования требований к перспективным двигателям и энергетическим установкам летательных аппаратов.

16. Процессы создания и доводки двигателей летательных аппаратов. Способы улучшения характеристик и основных данных двигателей, находящихся в серийном производстве и эксплуатации.

17. Методы и средства диагностики технического состояния двигателей и энергетических установок летательных аппаратов. Эксплуатационная технологичность.

18. Методы повышения живучести и снижения повреждаемости.

19. Методы расчета и моделирования динамики процессов управления двигателями; способы учета влияния летательного аппарата и условий эксплуатации на динамику процессов управления; способы оптимизации характеристик систем управления и топливопитания.

20. Методы и средства экспериментальных способов определения статических и динамических характеристик систем автоматического управления двигателями; способы оптимального построения систем управления; способы оптимальной передачи информации в системах автоматического управления двигателями.

21. Разработка методов расчета термогазодинамических и теплофизических процессов в двигателях и энергосиловых установках летательных аппаратов, их элементах.

22. Разработка методов решения сопряженных задач газовой динамики, теплообмена, взаимодействия потоков высокой энергии с материалами деталей и узлов ракетных двигателей.

23. Методы расчёта, проектирования и конструирования стендовых систем и систем для модельных и натурных испытаний двигателей и энергоустановок летательных аппаратов, их элементов.

**Отрасль науки:**

– технические науки;

**1. Двигатели и энергоустановки летательных аппаратов**

***1.1. Воздушно-реактивные двигатели (ВРД).***

Классификация и принципы действия ВРД. Двигатели прямой и непрямой реакции. Основные параметры, характеризующие ВРД. Термодинамические циклы ВРД. Зависимые работы и к.п.д. от основных параметров рабочего процесса и условий полета. Эффективная и внутренняя тяга.

Тяговая мощность, полный и полетный к.п.д. двигателей. Пути совершенствования ВРД как движителя.

Входные устройства ВРД. Основные параметры, характеризующие работу входных устройств.

Возможные типы входных устройств для сверхзвуковых скоростей полета.

Выходные устройства ВРД (реактивные сопла ВРД). Принципиальные схемы дозвуковых и сверхзвуковых выходных устройств. Основные параметры характеризующие их работу. Сопло Лавалья и выходные устройства других схем. Реверсивные устройства.

Типы камер сгорания ВРД. Требования к камерам сгорания. Основные параметры, характеризующие их эффективность. Топлива ВРД. Типы форсажных камер ТРДФ и ТРДДФ. Камеры сгорания СПВРД. Принципы организации рабочего процесса в прямоточных камерах сгорания различных схем. Принципиальные схемы подачи топлива в камеры сгорания двигателей.

Компрессор и турбина в системе ВРД. Основные схемы и требования к компрессорам и турбинам ГТД. Область и линия рабочих режимов на характеристиках вентилятора и компрессоров при их работе в системе ТРД и ТРДД. Границы устойчивой работы компрессора. Двух- и трех- каскадные компрессоры в системе ТРД и ТРДД. Способы обеспечения устойчивой работы компрессора. Основные типы и параметры турбинных ступеней ГТД. Одноступенчатые и многоступенчатые турбины. Способы и системы охлаждения двигателей и их деталей.

***1.2. Газотурбинные двигатели (ГТД).***

Классификация ГТД. Преимущества и недостатки различных типов ГТД, диапазон возможного применения по скорости и высоте полета. Понятие расчетного режима работы двигателя. Цель и порядок термогазодинамического расчета. Конструкция и проектирование ГТД.

Турбореактивные (ТРД) и турбореактивные форсированные (ТРДФ) двигатели. Параметры рабочего процесса ТРД и ТРДФ. Зависимость удельных параметров двигателей от параметров рабочего процесса и условий полета. Влияние параметров рабочего процесса и типа двигателя на удельную массу. Оптимальные параметры двигателей и их зависимостей от условий полета.

Высотно-скоростные и дроссельные характеристики ТРД и ТРДФ. Методы расчета характеристик двигателя. Колебания конструкций ТРД.

Турбореактивные двухконтурные (ТРДД) и турбореактивные форсированные (ТРДД) двигатели. Классификация ТРДД и ТРДДФ по схеме проточной части и ротора двигателя. Параметры рабочего процесса ТРДД и ТРДДФ. Зависимости удельной тяги и удельного расхода топлива ТРДД от параметров рабочего процесса и степени двухконтурности. ТРДД со смешением потоков. Оптимальное распределение энергии по контурам. Оптимальная степень двухконтурности.

Высотно-скоростные и дроссельные характеристики нефорсированного ТРДД. Удельные параметры ТРДДФ с общей форсажной камерой и с форсажом в наружном контуре. Высотно-скоростные и дроссельные характеристики ТРДДФ. Методы расчета характеристик ТРДДФ.

Турбовинтовые, турбовальные ГТД и энергоустановки. Турбовинтовые двигатели (ТВД). Оптимальное распределение свободной энергии между винтом и реактивным соплом. Влияние параметров рабочего процесса на удельную мощность, удельный расход топлива и удельную массу ТВД. Двигатели и энергоустановки с регенерацией тепла. Высотно-скоростные и дроссельные характеристики. Скоростные винтовентиляторные двигатели (ТВВД). Вертолетные ГТД.

Схемы силовых установок вертолетов.

Двигатели для самолетов вертикального и укороченного взлета и посадки (СВВП). Общие требования к силовым установкам СВВП. Эжекторные увеличители тяги. Сравнение различных силовых установок СВВП.

Динамика ГТД. Виды переходных режимов. Требования к динамике современных авиационных двигателей. Процессы приемистости и сброса газа у ТРД, ТРДД и ТВД. Пути улучшения приемистости ГТД. Общая характеристика процесса запуска ГТД. Запуск в полете. Авторотация.

Принципиальные схемы прямоточных и основных типов комбинированных двигателей. Возможные области применения. Виды топлив, используемых этими двигателями.

Прямоточные воздушно-реактивные двигатели. Удельные параметры ПВРД и их зависимость от параметров рабочего процесса и условий полета. Особенности рабочего процесса гиперзвукового прямоточного двигателя (ГПВРД). Тягово-экономические характеристики ПВРД.

Комбинированные ВРД. Турбопрямоточные двигатели. Схемы двигателей на базе ТРД и ТРДД.

Ракетно-турбинные двигатели (РТД). Схемы, рабочий процесс. Области применения этих двигателей.

### *1.3. Использование авиационных двигателей для создания вспомогательных и комбинированных энергоустановок.*

Назначение комбинированных энергоустановок различных типов. Особенности схем с утилизацией тепла выхлопных двигателей и дополнительным подводом тепла по тракту комбинированной энергоустановки. Открытые и закрытые утилизационные циклы. Типы парогенерирующих устройств. Классификация комбинированных энергоустановок на базе авиационных ГТД.

Понятие об эффективности к.п.д. установки и коэффициенте использования тепла.

Использование исходной или специально создаваемой свободной турбины. Редукторные и безредукторные схемы. Возможности использования авиационных редукторов. Промежуточный подогрев.

Схемы комбинированных установок со средненапорным, низконапорным и утилизирующим парогенератором или водогрейным котлом. Схема с использованием газогенератора двухвального ГТД и определение его параметров при демонтаже компрессора низкого давления. Форсирование газогенератора по оборотам и температуре газа.

Возможные схемы использования исходного ТРДД полный или частичный демонтаж вентилятора, узла промежуточных ступеней, определение параметров турбины при демонтаже узла компрессора низкого давления. Схема с размещением конденсатора во внешнем контуре. Использование полного двигателя – альтернатива использования ГТУ повышенной мощности.

Пути и методы дальнейшего совершенствования комбинированных энергоустановок на базе авиационных двигателей.

Энергетические установки с паротурбогенераторами. Схема паротурбинных энергетических установок. Выбор рабочего тела. Расчет параметров турбинного контура установки. Выбор параметров. Ограничения по кавитации и учет переохлаждения при выборе температуры цикла. Определение параметров теплообменных контуров установки и многопараметрическая оптимизация. Характеристики паротурбинной установки. Особенности запуска в условиях полета. Энергомассовые характеристики и КПД установки. Технология производства, заправки и испытаний.

Энергетические установки с газотурбогенераторами. Схема газотурбинных энергетических установок с солнечным, ядерным и радиоизотопным источником тепла. Зависимость выбора рабочего тела от уровня мощности установки. Влияние параметров рабочего процесса на удельные параметры установки. Оптимизация параметров.

Совместная работа газотурбокомпрессора и его характеристики. Запуск энергетической установки с газотурбогенератором. Условия обеспечения надежности установки.

## **2. Производство тепловых двигателей и энергоустановок летательных аппаратов**

### **2.1. Основы технологии производства двигателей.**

Основные понятия технологии производства. Производственный процесс и его составляющие. Конструкторские и технологические методы обеспечения качества. Технологические методы создания высоконадежных и долговечных конструкций. Состояние поверхностного слоя детали, остаточные напряжения в нем и их влияние на ресурс детали. Понятие о точности и производственных погрешностях. Методы контроля точности и устойчивости технологических процессов. Основные сведения о базах. Правила базирования при изготовлении деталей и сборке двигателей.

Понятие взаимозаменяемости. Методы обеспечения взаимозаменяемости в производстве двигателей.

Понятие технологичности конструкции. Качественные и количественные показатели технологичности. Последовательность обеспечения технологичности конструкции при проектировании и подготовке производства.

Показатели экономической эффективности. Технологические методы повышения производительности труда. Технологическая себестоимость, структура и пути ее снижения технологическими методами.

### **2.2. Процессы изготовления деталей двигателей и энергоустановок.**

Тенденции и основные направления развития технологий современного наукоемкого производства.

Технологическая подготовка производства двигателей, ее функциональные задачи и особенности. Производственный процесс изготовления деталей. Общий и частные технологические процессы.

Инновационные технологии получения объемных и листовых заготовок.

Инновационные технологии механической обработки деталей. Технологическое оборудование для механической обработки деталей, инструмент, технологические возможности и особенности процессов резания. Многооперационное оборудование ЧПУ. Особенности обработки деталей на оборудовании с ЧПУ.

Инновационные технологии физико-химической обработки и поверхностного упрочнения деталей. Достоинства и недостатки процессов ЭЭО и ЭХО. Технологическое оборудование и инструмент для ЭЭО и ЭХО.

Технологические процессы и методы обеспечения эксплуатационных свойств ответственных деталей двигателей летательных аппаратов. Технологические возможности и оборудование для реализации процессов.



Аддитивные технологии в производстве наукоемких изделий. Их классификация, области использования, преимущества и недостатки. Факторы, влияющие на качество изделий, изготовленных с применением аддитивных технологий.

Разработка технологических процессов обработки деталей, процессов сборки и испытаний двигателя.

### ***2.3. Процессы узловой и общей сборки двигателей***

Объем, содержание и условия сборочных работ в производстве двигателей. Методы и способы базирования при сборке. Методы сборки, обеспечивающие необходимую точность сборочных параметров. Проектирование процессов узловой и общей сборки двигателей. Контроль сборочных параметров в процессе сборки.

### ***2.4. Процессы испытания двигателей и энергоустановок***

Виды испытаний узлов, агрегатов и изделия в целом. Основные цели, задачи, и особенности испытаний: кратковременных, длительных, ускоренных эквивалентных; конструкторско-доводочных (КДИ), приемосдаточных (ПСИ), контрольно-выборочных (КВИ), периодических (ПИ), государственных; стендовых, летных. Классификация и общая характеристика испытаний по воздействующим факторам. Программы проведения испытаний. Основные требования, предъявляемые к результатам и условиям проведения испытаний. Приборы, устройства и оборудование испытательных стендов и испытательных станций. Стендовые испытания двигателей в условиях, приближенных к эксплуатационным условиям. Приведение результатов испытаний к стандартным атмосферным условиям.

## **3. Автоматизация процессов проектирования, конструирования и производства двигателей и энергоустановок летательных аппаратов**

### ***3.1. Управление разработкой, автоматизация проектирования, конструирования и производства.***

Многоуровневое программно-целевое управление разработкой. Задачи макропроектирования. Постановка задачи оптимизации управления разработкой. Методики решения проектных задач с учетом риска и компромисса. Методика комплексной оптимизации конструкторско-технологических параметров изделий.

Принципы организации и структура систем автоматизированного проектирования и конструирования (САПР). Комплекс технических средств, математическое обеспечение, информационное и программное обеспечение. Роль современных информационных и цифровых технологий. Задачи проектировщика в САПР. Автоматизированные системы технологической подготовки производства (АСПП). Автоматизация испытаний двигателей и энергоустановок. Структурная схема системы автоматизации испытаний.

### Основная литература

1. Егер С.М., Матвеев А.М., Шаталов И.А. Основы авиационной техники: Учебник / Под ред. И.А. Шаталова. – Изд. третье, исправл. и доп. - М.: Машиностроение, 2003. – 720 с.
2. Житомирский Г.И. Конструкция самолетов. М.: Машиностроение, 1991. Испытания, обеспечение надежности и ремонт авиационных двигателей и энергетических установок: Учеб. пособие / Ю.С. Елисеев, В.В. Крымов, К.А. Малиновский, В.Г. Попов, Н.Л. Ярославцев. – М.: Изд-во МАИ, 2005. – 540 с.: ил.
3. Коптев Ю.Н., Мишин В.П., Матвеев Ю.А. Задачи проектирования и управления развитием ЛА: Учеб. пособие / Под ред О.М.Алифанова. М.: Изд-во МАИ, 1997.
4. Норенков И.П., Кузьмик П.К. Информационная поддержка наукоемких изделий. CALS-технологии. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 320с.
5. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования: Учеб. для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 448 с.: ил.
6. Процессы механической и физико-химической обработки в производстве авиационных двигателей: Учеб. пособие для вузов / А.Г. Бойцов, А.П. Ковалев, А.С. Новиков, А.Г. Пайкин, Л.А. Хворостухин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 584 с., ил.
7. Селиванов, С.Г., Гузаиров, М.Б., Кутин, А.А. Инноватика: Учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 2008. – 721 с.
8. Системы оборудования летательных аппаратов / В.И. Бекасов, А.С. Евсеев, А.М. Матвеев и др. М.: Машиностроение, 1986.
9. Скубачевский Г.С. Авиационные ГТД, конструкция и расчет деталей. 5-е изд. перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1981.
10. Технологичность конструкции изделия: Справочник / Ю.Д. Амиров, Т.К. Алферова, П.Н. Волков и др.; Под общ. ред. Ю.Д. Амирова. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1990. - 768 с.: ил.
11. Технология производства авиационных газотурбинных двигателей: Учеб. пособие для вузов / Ю.С. Елисеев, А.Г. Бойцов, В.В. Крымов, Л.А. Хворостухин. – М.: Машиностроение, 2003. – 512 с., ил.
12. Энергоемкие горючие для авиационных и ракетных двигателей / Под ред. Л.С. Яновского. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 400 с.

### Дополнительная литература

1. Иностранные авиационные двигатели, 2005: Справочник ЦИАМ / Общая редакция: В.А. Скибин, В.И. Солонин. – М.: Изд. дом «Авиамир», 2005. – 592 с.: ил.
2. Клочков В.В. Управление инновационным развитием гражданского авиастроения: монография. – М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2009 – 280 с.
3. Павлов В.В. Структурное моделирование в CALS-технологиях. - М.: Наука, 2006. - 307 с.

4. Приоритеты авиационных технологий: В 2-х кн. / Науч. ред. А.Г. Братухин. – М.: Изд-во МАИ, 2004.
5. Международная энциклопедия CALS. Авиационно-космическое машиностроение. / Гл. ред. А.Г. Братухин. М.: ОАО "НИЦ АСК". 2015. 608 с.
6. Руководство по сертификации и надзору за производством изделий авиационной техники, АР МАК, 1997.
7. Технология производства двигателей летательных аппаратов / А.М. Сулима и др. М.: Машиностроение, 1996.
8. Шатраков А.Ю., Алдошин В.М., Колганов С.К., Юрченко Е.В. Инновационная деятельность высокотехнологичных предприятий. – М.: Экономика, 2007 – 176 с.

Программа составлена:  
докт. техн. наук, профессор



И.В.Шевченко

Заведующий кафедрой  
Инновационных технологий наукоемких отраслей  
докт. техн. наук, доцент



А.Н. Рогалев

Директор Института энергоэффективности  
и водородных технологий  
канд. техн. наук, доцент



И.А. Щербатов