

**ПРОГРАММА-МИНИМУМ**

**кандидатского экзамена по специальности**

**05.07.05 «Тепловые, электроракетные двигатели  
и энергоустановки летательных аппаратов»**

по техническим наукам

## **Введение**

В основу настоящей программы положены следующие дисциплины: теоретическая механика; теория надежности и эффективности; теория переходных процессов; теория оптимизации; термодинамика; физико-химические законы горения; методы преобразования энергии; теория проектирования и технология создания двигателей и энергоустановок летательных аппаратов; теория колебаний; теория вероятности и математическая статистика; математическое моделирование рабочих процессов и этапов жизненного цикла двигателей и энергоустановок летательных аппаратов.

Программа разработана экспертным советом Высшей аттестационной комиссии Министерства образования Российской Федерации по авиационно-космической и ракетной технике при участии МАИ(ТУ) им. С. Орджоникидзе, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского и ЦИАМ им. П.И. Баранова.

## **1. Авиационные 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. Работы и КПД, зависящие от основных параметров рабочего процесса и условий полета. Эффективная и внутренняя тяга. Тяговая мощность, полный и полетный КПД 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 трехкаскадные компрессоры в системе ТРД и ТРДД. Способы обеспечения устойчивой работы компрессора. Основные типы и параметры турбинных ступеней ГТД. Одноступенчатые и многоступенчатые турбины.

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 зависимости от условий полета. Высотно-скоростные и дроссельные характеристики ТРД и ТРДФ. Методы расчета характеристик двигателя. Колебания конструкций ГРД.

Турбореактивные двухконтурные (ТРДД) и турбореактивные форсированные (ТРДДФ) 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 форсажем 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 топлива, используемого 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.

## ***1.2. Двигатели внутреннего сгорания (ДВС).***

Двигатели внутреннего сгорания как источник энергии. Классификация ДВС. Основные схемы ДВС. Четырех- и двухтактные двигатели с искровым зажиганием.

Двигатели дизеля (четырёх- и двухтактные). Рабочие циклы ДВС. Пути дальнейшего совершенствования ДВС.

Термодинамические циклы различных типов ДВС и их основные параметры. Индикаторные диаграммы. Работа цикла. Термический КПД цикла. Эффективная работа и эффективный КПД. Среднее индикаторное давление.

Наддув ДВС и его влияние на характеристики. Типы систем наддува и их сравнение. Приводной компрессор. Турбонаддув. Влияние наддува на параметры ДВС.

Контактная система зажигания. Калильное число. Контактнo-транзисторная система зажигания. Электронная бесконтактная система зажигания с датчиком Холла. Цифровая система зажигания.

Токсичность выхлопа продуктов сгорания ДВС. Методы измерения токсичности ДВС. Дополнительные устройства снижения токсичности (нейтрализаторы, термические реакторы, системы рециркуляции).

### ***1.3. Использование авиационных двигателей для создания 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 КПД установки и коэффициенте использования тепла.

Использование «родной» 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.

## **2. Ракетные двигатели**

### ***2.1. Общие вопросы теории ракетных двигателей.***

Типы ракетных двигателей (РД). Классификация РД. Ракетные двигатели на химических топливах: ЖРД, РДТТ, ГРД. Ядерные ракетные двигатели. Лазерные и солнечные двигатели. Особенности и области применения различных типов РД.

Уравнения тяги РД. Коэффициенты полезного действия РД (термический, тяговый, общий). Характеристические параметры РД: удельный импульс, характеристическая скорость, коэффициент тяги сопла, удельная масса. Оценка потерь в камере РД. Расчет тяги и удельного импульса камеры РД с использованием газодинамических функций.

Устройство и оценка совершенства сопел. Режимы недорасширения и перерасширения. Тяга камеры при отрыве потока от стенок сопла. Анализ и оценка потерь в соплах.

Высотная характеристика. Регулирование высотности сопла. Дроссельная характеристика ЖРД.

Основные сведения о жидких, твердых и гибридных ракетных топливах и их физико-химические характеристики. Топлива гидрореагирующих РД. Воспламенение топлив. Основы расчетов термохимических свойств топлив.

Особенности конвективного теплообмена в камере сгорания и сопле. Методы расчета конвективных тепловых потоков на основе решения уравнений пограничного слоя. Расчеты конвективного теплообмена на основе теории подобия.

Лучистый теплообмен в условиях камеры сгорания и сопла РД. Расчет лучистых тепловых потоков.

Теплозащитные покрытия и механизмы их разрушения.

## **2.2. Жидкостные ракетные двигатели (ЖРД).**

Процессы в камере сгорания и их расчет. Выбор и определение основных параметров камеры сгорания. Приведенная длина камеры сгорания.

Особенность процессов в газогенераторах (однокомпонентных и двухкомпонентных, окислительных и восстановительных). Особенности и схемы теплозащиты стенок камеры ЖРД.

Неустойчивость рабочего процесса в ЖРД.

Типы систем подачи в ЖРД и области их применения. Расчет и выбор оптимальной системы подачи в зависимости от назначения двигателя и энергоустановки.

Принципиальные схемы ТНА. Расчет основных параметров турбин и насосов ТНА. Совместная работа насосов с турбиной.

Факторы, определяющие экономичность системы ТНА. Потери в насосах, турбинах и магистралях.

Особенности расчета ЖРД с дожиганием.

Регулирование тяги ЖРД с дожиганием. Расчет и выбор оптимальных параметров ЖРД. Динамика и регулирование ЖРД. Типы ЖРД малой тяги: химические и электрохимические с каталитическим разложением. Основные тенденции и перспективы развития ЖРД.

Повышение надежности, ресурса, многократности применения ЖРД, создание двигателей с глубоким регулированием тяги.

### **2.3. Ракетные двигатели на твердом топливе (РДТТ).**

Основные сведения о физико-химических законах горения баллистических и смесевых ТРТ. Зависимости скорости горения ТРТ от давления и начальной температуры. Эрозионное горение.

Общие законы изменения формы элемента заряда в процессе горения. Типы зарядов ТРТ. Плотность заражения камеры сгорания, основные ограничения плотности заражения. Расчет основных типов зарядов ТРТ.

Сведения о газодинамических функциях. Расчет течения газов при различных формах зарядов ТРТ. Течение газа в предопловом объеме камеры. Течение газа через местные сопротивления.

Процесс воспламенения основного заряда ТРТ. Выбор типа и массы заряда воспламенительного устройства. Приближенный расчет изменения давления в камере при запуске двигателя.

Способы регулирования тяги РДТТ по величине: предстартовое регулирование и регулирование в полетных условиях. Способы отсечки тяги. Пути создания РДТТ с многократным включением.

Неустойчивость рабочего процесса в РДТТ.

Принципиальные схемы гибридных ракетных двигателей, модели горения в них. Расчет основных параметров рабочего процесса ГРД.

Перспективы развития РДТТ.

### **2.4. Ядерные ракетные двигатели (ЯРД).**

Основные схемы и параметры ЯРД, области применения. Основные показатели ЯРД с твердофазным реактором. Основные элементы и схемы, требования к ним. Основные характеристики рабочих тел. Методы преобразования энергии. Понятие о характеристиках рабочего процесса и основные показатели ЯРД с газифазным реактором.

### **2.5. Комбинированные ракетные двигатели.**

Использование рабочего тела из внешней среды. Эжекторные насадки. Жидкостные воздушные ракетные двигатели (ЖВРД) и их системы подачи. Лазерные РД.

## **3. Электроракетные двигатели и энергетические установки космических аппаратов (КА)**

### **3.1. Двигательные, энергетические и энергосиловые установки.**

Потребности КА в бортовой энергетике и необходимость создания энергосиловых установок (ЭСУ) и электроракетных двигателей (ЭРД), энергетических установок (ЭУ) различных типов.

Классификация, принципиальные схемы и основные характеристики источников энергии: солнечных, химических, ядерных и радиоизотопных. Системы преобразования энергии в электрическую: турбомашинные, магнетогазодинамические, термоэмиссионные, термоэлектрические, термоэлектромеханические, электрохимические. Теплообменные аппараты и холодильники-излучатели. Представление о механизмах ускорения рабочего тела в ЭРД. Классификация ЭРД. Рабочие процессы в двигателях.

Структурные схемы ЭСУ, ЭУ и ЭРДУ. Взаимосвязь их параметров и характеристик. Требования к рабочим телам ЭСУ и области их применения.

### **3.2. Источники плазмы и заряженных частиц.**

Эмиссия заряженных частиц. Термоэлектронная и автоэлектронная эмиссия. Физические процессы и основные зависимости. Эмиссия ионов. Особенности поверхностной ионизации. Влияние электрических полей и плазмы на эмиссионные характеристики. Вторичная электронная и ионная эмиссия, адсорбация и десорбация, испарение и катодное распыление. Характеристики приэлектродных слоев.

Газоразрядные источники плазмы и ионов. Прямая и ступенчатая ионизация. Схемы газоразрядных источников ионов и их характеристики. Роль магнитных полей в источниках ионов. Рабочие процессы в источниках. Основные потери энергии. Расчет параметров источников ионов. Зависимости, определяющие значение полного тока. Ускорение плазмы и заряженных частиц. Влияние электрических и магнитных полей на движение плазмы и заряженных частиц. Различные механизмы ускорения. Классификация ускорителей и двигателей. Двигатели и движители, их основные характеристики.

### **3.3. Движители с тепловым ускорением потока.**

Электронагревательные движители (ЭНД). Схемы и особенности рабочих процессов. Требования к нагревателям и конструкции проточной части.

Плазменные движители с тепловым ускорением (электродуговые двигатели— ЭДД). Схемы и принципы действия. Особенности рабочих процессов, потери энергии и импульса в движителях. Методы расчета характеристик электротермических (электродуговых) движителей.

Импульсные плазменные движители с тепловым ускорением. Схемы и принципы работы движителей с газообразным рабочим телом, с жидкими и твердыми диэлектриками. Особенности рабочих процессов и методы расчета характеристик. Влияние различных факторов на характеристики движителей.

### **3.4. Движители с электромагнитным ускорением плазмы.**

Основные представления. Одномерные течения и их применение к расчету параметров движителя. Границы применения одномерных МГД-течений. Двумерные течения плазмы. Особенности течения плазмы в движителях. Характерные области течения и процессы в них. Выбор физической и математической модели процесса ускорения плазмы.

Схемы и принципы действия плазменных движителей с электромагнитным ускорением плазмы. Особенности рабочего процесса коаксиальных плазменных движителей с собственным магнитным полем.

Торцевые сильноточные движители. Схемы и особенности рабочих процессов. Расчет параметров и интегральных характеристик движителей. Кризис течения, предельные режимы. Неустойчивость и развитие колебаний потенциала и тока.

Торцевые холловские движители. Схемы и принципы действия. Характерные зоны и области рабочих процессов. Роль отдельных механизмов ускорения и создания тяги. Влияние внешнего магнитного поля на характеристики. Методы управления вектором тяги с помощью внешних магнитных полей.

Импульсные плазменные двигатели с электромагнитным ускорением. Схемы и принципы действия. Модели ускорения рабочего тела. Расчет параметров и характеристик двигателей.

### ***3.5. Двигатели с электростатическим ускорением.***

Процессы ускорения ионов и плазмы электрическим полем. Ионно-оптические системы с электрическим и магнитным воздействием на потоки частиц. Методы расчета ионно-оптических систем и параметров потока ионов. Влияние различных факторов на фокусировку ионов и плазмы. Нейтрализация ионного потока. Рабочие процессы катодов-компенсаторов.

Двигатели с замкнутым дрейфом электронов и протяженной зоной ускорения. Схемы и основы рабочего процесса. Распределение потенциала и концентрации частиц в канале. Роль изоляционных стенок ускорительного канала. Колебания и их влияние на рабочий процесс. Характеристики двигателей.

Двигатели с замкнутым дрейфом электронов и ускорений ионов в анодном слое. Характерные особенности процессов. Роль источников плазмы. Влияние различных факторов на параметры плазмы и потока ионов.

Ионные двигатели. Схемы и принципы действия поверхностных и объемных источников ионов. Основные процессы в источниках ионов. Взаимосвязь процессов в источнике ионов и ионно-оптической системе. Расчет параметров и характеристик двигателей. Основные потери массы, импульса и энергии. Особенности рабочих процессов в двигателях на переменном токе.

Коллоидные двигатели с электростатическим распылением и ускорением тяжелых частиц и полевые двигатели. Схемы и принцип действия. Основные особенности рабочих процессов. Требования к рабочим телам. Дисперсия частиц по массе и удельному заряду и ее влияние на рабочий процесс. Характеристики источников заряженных частиц и двигателей. Основные параметры полевых двигателей.

### ***3.6. Методы исследования рабочих процессов двигателей.***

Методы диагностики плазмы, потоков заряженных частиц. Электростатические зонды, магнитные зонды, пьезо и термозонды. Спектральные методы измерения параметров плазмы. Условия применимости основных методик определения параметров плазмы. Методы пучковой диагностики (электронной, ионной, атомарной). Условия применимости, погрешности отдельных методов. Лазерная диагностика и особенности ее применения к определению параметров плазмы. Микроволновые методы определения параметров плазмы.

### ***3.7. Системы питания двигателей.***

Взаимосвязь узлов двигательной установки. Основные системы, обеспечивающие работу электроракетной двигательной установки (ЭРДУ) как сложного комплекса элементов различного назначения. Структурные схемы взаимосвязей узлов с ЭРДУ с системами питания рабочим телом, энергией, системами регулирования параметров и т.д. Влияние особенностей рабочих процессов двигателей на выбор типа систем.

Системы питания рабочим телом. Системы питания электроэнергией.

Взаимосвязь параметров и характеристик систем питания с параметрами и характеристиками двигателей, их системами и другими элементами ЭРДУ и ЭСУ. Взаимное согласование статических и динамических характеристик ЭРДУ и их систем. Согласование работы электроракетных двигателей различных схем и назначения с системой энергопитания и энергетической установкой.

### ***3.8. Генераторы и ускорители плазмы, заряженных пучков и частиц.***

Расчет параметров и характеристик генераторов и ускорителей различных схем. Оптимизация параметров. Конструкция генераторов и ускорителей. Технология производства, испытания и применение генераторов и ускорителей. Взаимодействие потоков плазмы, заряженных частиц и пучков с поверхностью твердого тела и окружающей средой.

### ***3.9. Источники энергии для космических энергосиловых установок.***

Лучистые источники энергии. Характеристики солнечного излучения в околоземном и межпланетном пространстве. Концентраторы солнечной энергии, основные виды и их характеристики. Приемники лучистой энергии. Селективные поверхности и их роль в повышении эффективности использования солнечной энергии.

Ядерные энергетические установки космических аппаратов. Особенности рабочих процессов, параметров, характеристик и конструкции ядерных реакторов ЛА. Нейтронно-физический и тепловой расчеты реакторов. Распределение параметров в активной зоне. Регулирование мощности. Круговая и теневая защиты от излучения. Системы отвода тепла. Запуск ядерной энергетической установки в космическом пространстве.

Радиоизотопные источники энергии. Виды радиоактивных топлив. Характеристики радиоизотопных тепловых блоков. Регулирование теплового потока. Особенности эксплуатации радиоизотопных источников.

Химические источники энергии. Виды и характеристики систем компонентов. Системы хранения и подачи. Баллонные, криогенные, связанные системы и их характеристики.

### ***3.10. Энергетические установки с солнечными батареями.***

Особенности и области использования фотоэлектрических энергетических установок. Основные процессы в фотоэлектрическом преобразователе на р-n-переходе. Образование пар. Процессы переноса заряда и рекомбинации. Потери энергии и КПД фотоэлектрического преобразователя. Возможности повышения эффективности.

Характеристики преобразователей, влияние на них температуры, радиации. Методы повышения стойкости и надежности. Солнечные батареи, системы раскрытия, ориентации, резервирования. Характеристики и КПД солнечных батарей. Согласование характеристик с потребителями.

### ***3.11. Энергетические установки с термоэлектрическими генераторами.***

Физико-энергетические основы термоэлектричества. Виды термоэлектрических материалов. Баланс энергии и КПД термоэлектрических генераторов. Каскадные термоэлементы. Расчет термоэлементов. Расчет многоэлементных термоэлектрических

генераторов. Основные характеристики. Термоэлектрические генераторы ядерных энергетических установок. Термоэлектродгенераторы с радиоизотопными источниками энергии. Надежность и испытания энергетических установок с термоэлектрическими генераторами. Согласование характеристик с потребителями. Выбор и оптимизация параметров энергетических установок. Конструкция энергетических установок с термоэлектрическими генераторами и их элементов. Особенности учета термических напряжений. Технология производства установок и их элементов.

### ***3.12. Энергетические установки с термоэмиссионными преобразователями***

Термоэлектронная эмиссия. Процессы на электродах термоэмиссионного преобразователя (ТЭП). Снижение работы выхода металлопленочных покрытий. Процессы переноса в межэлектродном зазоре. Нейтрализация объемного заряда. Режимы работы ТЭП: вакуумный, диффузионный и дуговой. Электрические характеристики ТЭП. Влияние параметров рабочего процесса, конструкции и технологии на КПД преобразователя.

Реакторы-генераторы с термоэмиссионными преобразователями. Влияние распределения температуры и энерговыделения на параметры генератора. Одноэлементные и многоэлементные электрогенерирующие каналы. Особенности коммутации. Потери энергии на электродах и коммутационных переключках. Характеристики термоэмиссионных генераторов при постоянных температурах электродов и при постоянной тепловой мощности. Энергомассовые характеристики энергетических установок с ТЭП. Надежность и испытания параметров энергетических установок с ТЭП. Особенности учета термических напряжений в элементах ТЭП. Конструкции установок и их элементов. Технология производства, сборки и заправки установок с ТЭП и их элементов.

### ***3.13. Энергетические установки с термоэлектрохимическими преобразователями (ТЭХП)***

Процессы переноса ионов в твердых и загущенных электролитах под действием перепада давления, разности концентраций рабочего компонента. Термодинамика термоэлектрохимического преобразования. Процессы на газодиффузионных электродах. Процессы испарения, ректификации и конденсации рабочего компонента. Выбор рабочих компонентов, подача рабочего компонента. Однокомпонентные и двухкомпонентные схемы ТЭХП. Характеристики ТЭХП. Расчет параметров и основных размеров. Энергомассовые характеристики. КПД ТЭХП. Выбор и оптимизация энергетических установок с ТЭХП. Радиоизотопные установки с ТЭХП. Особенности конструкции и технологии установок с ТЭХП.

### ***3.14. Энергетические установки с электрохимическими генераторами (ЭХГ).***

Элементы электрохимической кинетики. Электрохимическое равновесие. Двойной электрический слой на границе металл—электролит. Элементарный акт электрохимической реакции. Прохождение тока через электролит. Виды поляризации: омическая, активационная и концентрационная. Термодинамический, электрический и токовый КПД генератора. Температурный коэффициент ЭДС. Виды электрохимических генераторов и топливных элементов. Применяемые рабочие компоненты. Удельная

энергия и удельная мощность. Оптимизация параметров электрохимического генератора. Системы хранения и подачи компонентов в ЭХГ. Баллонное, криогенное и связанное хранение компонентов. Энергетические установки с ЭХГ. Согласование характеристик ЭХГ с потребителями энергии. Совместная работа ЭХГ с другими источниками энергии. Генеративные ЭХГ. Конструкции установок с ЭХГ и их элементов. Надежность и испытания энергетических установок с ЭХГ. Технология производства, сборки и заправки установок с ЭХГ и их элементов.

**3.15. Энергетические установки с магнитогидродинамическими (МГД) генераторами.** Течения плазмы в скрещенных электрическом и магнитном полях. Интегрирование уравнений одномерного движения для частных случаев. Локальный анализ МГД-генераторов.

Выбор схемы и расчет параметров мощной МГД-установки открытого цикла на химическом источнике энергии. Ядерные плазменные МГД-установки замкнутого цикла. Жидкометаллические МГД-установки с ядерным и радиоизотопным источниками энергии. Энергомассовые характеристики. Надежность и испытания установок. Конструкция установок с МГД-генераторами. Технология производства МГД-генераторов.

**3.16. 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.

**3.17. 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.

**3.18. Поршневые и роторные энергетические установки.**

Энергетические установки с двигателем Стирлинга. Особенности использования солнечных и радиоизотопных источников тепла. Рабочий процесс. Выбор и оценка параметров. Удельные характеристики и КПД. Особенности обеспечения ресурса и надежности установки. Характеристики установки. Особенности конструкции и обеспечения длительной прочности. Роторные энергетические установки. Особенности рабочего процесса. Удельные параметры и характеристики.

### ***3.19. Комбинированные и энергосиловые установки.***

Энергетические установки с каскадом преобразования. Повышение КПД и удельных характеристик при оптимальном каскадировании. Выбор систем преобразования для первого и второго каскадов.

Комбинированные энергетические установки. Использование накопителей и аккумуляторов для обеспечения заданного допуска по напряжению бортовой сети при изменении нагрузки. Комбинирование различных энергетических подсистем для обеспечения заданных, в том числе кратковременных, импульсов энергопотребления.

Совместная работа электроракетного двигателя и энергетической установки в составе энергосиловой системы. Увязка параметров. Характеристики при изменении нагрузки. Особенности запуска установки и двигателей. Неустойчивые режимы работы.

### ***3.20. Проектирование и выбор параметров, вида и облика энергосиловой установки и ее подсистем.***

Общие проблемы проектирования энергосиловых, энергетических и двигательных установок. Компонентные схемы установок с различными источниками энергии, различными преобразователями и двигателями. Влияние задачи полета и типа ЛА на выбор схемы. Многопараметрическая оптимизация.

## **4. Проектирование конструкций тепловых, электроракетных двигателей и энергетических установок летательных аппаратов**

### ***4.1. Процесс проектирования и его особенности.***

Формализация процесса проектирования по стадиям и задачам. Стадии процесса проектирования, цели и возможности применения для них САПР. Классификация, особенности и разновидности САПР. Задача структурного синтеза. Задача параметрического синтеза и анализа. Принципы интерактивного проектирования. Особенности системного подхода к проектированию. Иерархия процесса проектирования. Уровень концепции. Уровень имитационного моделирования. Методы решения задач структурного синтеза. Морфологические методы. Трансформационные методы. Методы решения задач параметрического анализа. Однокритериальная и многокритериальная оптимизация. Выбор критериев оптимальности. Методы принятия решений проектировщиком. Критерии выбора. Методы задания предпочтения на множестве частных критериев. Экспертные системы.

### ***4.2. Автоматизация проектирования и конструирования.***

Понятие системного подхода к построению САПР. Двигатель как сложная система и принципы ее декомпозиции. Понятие информационной модели САПР. Системы и подсистемы САПР. Математическое моделирование процесса проектирования. Интуитивная концептуальная модель и ее усложнение по мере учета различных факторов. Понятие верификации действий. Типовые структуры подсистем САПР – проектирования, выпуска конструкторской документации, технологической подготовки производства. Интегрированные системы конструирования и технологии.

### **4.3. Моделирование в САПР.**

Математическое моделирование как средство исследования сложных технических подсистем двигателя. Классификация математических моделей. Требования к математическим моделям. Основные задачи, возникающие при математическом моделировании с использованием САПР. Задачи гидрогазо-динамики. Задачи теплопередачи. Задачи прочности. Задачи динамики и регулирования. Методы решения возникающих задач. Метод конечных элементов. Компьютерная графика и геометрическое моделирование. Плоское и объемное моделирование. Операции визуализации двухкамерной графики. Методы анализа статических режимов. Методы анализа переходных процессов. Проектирование оптимальных систем и конструкций тепловых, электроракетных двигателей и энергетических установок.

### **4.4. Программное обеспечение САПР.**

Классификация программного обеспечения. Средства разработки программ. Расчетно-оптимизационные системы. Графоаналитические системы. Графические системы. Системы автоматизации выпуска конструкторской документации. Системы технологической подготовки производства. Системы баз данных. Системы принятия решений. Экспертные системы. Программы наиболее употребляемых систем САПР (MATCAD, AUTOCAD, MATLAB, NASTRAN).

## **5. Технология производства тепловых, электроракетных двигателей и энергетических установок летательных аппаратов**

### **5.1. Производственный и технологический процесс.**

Структуры технологического процесса. Этапы технологического процесса и виды операций, концентрация и дифференциация операций. Операционные припуски. Классификация оборудования. Типовые схемы организации производства тепловых двигателей и энергетических установок. Организационно-технические методы совершенствования производственной структуры. Экономическая эффективность вариантов технологических процессов изготовления основных деталей.

Погрешности обработки. Главные составляющие суммарной погрешности обработки по исходному размеру. Суммирование погрешностей. Экономическая целесообразность уровня точности изготовления деталей тепловых двигателей и энергетических установок ЛА.

Классификация поверхностей и баз. Принцип совмещения баз при построении операций и установлении порядка операций в технологическом процессе. Вспомогательные установочные базы, первичные базы. Правило выбора баз.

Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей.

Понятие технологичности конструкции изделия, узла, детали, технологичность материалов. Критерии оценки технологичности. Этапы отработки технологичности. Технологичность деталей из металлических и неметаллических материалов в связи с особенностями механической, электрофизической, электрохимической и др. их видов обработки. Технологичность конструкций деталей, полученных объемным

деформированием и литьем с применением сварных и паяных соединений. Технологичность деталей из листовых и композиционных материалов.

Принципы разработки технологического процесса.

### ***5.2. Методы обработки конструкционных материалов.***

Основные проблемы обрабатываемости современных конструкционных материалов. Физические основы обработки конструкционных материалов. Методы обработки поверхностей. Физико-химические методы обработки материалов. Технология изготовления радиационно опасных узлов. Специальные технологические методы изготовления электродов и электрогенерирующих узлов.

### ***5.3. Технологические методы повышения надежности тепловых, электроракетных двигателей и энергетических установок летательных аппаратов.***

Влияние химического состава и структурно-фазового состояния поверхностного слоя на износостойкость и коррозионную стойкость. Упрочнение поверхностным пластическим деформированием. Группы методов поверхностной термической обработки. Технология электронно-лучевой и лазерной (квантовой) термической обработки. Термомеханическая обработка, особенности структурного состояния. Повышение эксплуатационных свойств деталей. Защитно-упрочняющие покрытия. Химико-термическая обработка. Лазерная обработка. Ионное легирование.

### ***5.4. Механизация и автоматизация производства тепловых, электроракетных двигателей и энергетических установок летательных аппаратов***

Технологическое оснащение производства. Методика проектирования средств механизации. Стандартизация и унификация приспособлений: сборно-разборные и универсально-сборные приспособления.

Системы автоматического управления, устройства и аппаратура автоматического управления технологическим процессом; автоматизация контроля точности обработки. Автоматические линии. Экономическая эффективность автоматической линии. Гибкое автоматизированное производство. Промышленные роботы. Переналаживаемая автоматизированная оснастка.

### ***5.5. Технология сборки тепловых, электроракетных двигателей и энергетических установок летательных аппаратов.***

Формы организации сборочных работ, средства механизации и оборудование сборочного цеха. Критерии оценки сборочной технологичности конструкции, ее значение для унификации и автоматизации процессов сборки. Проектирование технологического процесса сборки. Технологические методы достижения заданной точности сборочных параметров. Контроль основных сборочных параметров: зазоров, биения, способности, центровки собираемых узлов. Балансировка роторов. Специфичность понятия точности балансировки, расчет допустимых значений дисбалансов для проектируемых изделий. Оборудование для балансировки. Способы низкочастотной и высокочастотной балансировки роторов. Основы автоматизации проектирования технологических процессов балансировки.

Особенности технологии изготовления и сборки узлов и элементов ЭРДУ и ЭУ. Характерные требования к чистоте изготовления и сборки элементов. Методы технологии

в атмосфере инертного газа и вакууме. Заправка щелочными металлами ЭРДУ, ЭУ и их узлов. Изготовление тепловых труб, систем подачи цезия и т.д. Металлокерамические узлы и особенности их сборки в составе подсистем ЭРДУ и ЭУ. Обеспечение точности и контролируемой чистоты сборки электродных систем. Узловая и общая сборка изделий.

## Основная литература

Теория и расчет воздушно-реактивных двигателей / В.М. Акимов, В.И. Бакулев, Р.И. Курзинер и др.; Под ред. проф. С.М. Шляхтенко. М.: Машиностроение, 1987.

Теория двухконтурных турбореактивных двигателей / В.П. Деменченко, Л.Н. Дружинин, А.Л. Пархомов и др.; Под ред. проф. С.М. Шляхтенко и В.А. Сосунова. М.: Машиностроение, 1979.

Холщевников К.В., Емин О.Н., Митрохин В.Т. Теория и расчет авиационных лопаточных машин. М.: Машиностроение, 1986.

Курзинер Р.И. Реактивные двигатели для больших сверхзвуковых скоростей полета. М.: Машиностроение, 1989.

Двигатели внутреннего сгорания. В 3 кн. Кн.1. Теория рабочих процессов: Учебник / В.Н. Луканин, К.А. Морозов, А.С. Хачиян и др.; Под. ред. В.Н. Луканина. М.: Высш. школа, 1995.

Двигатели внутреннего сгорания: теория поршневых и комбинированных двигателей: Учебник / Д.Н. Вырубов, Н.А. Иващенко и др.; Под общ. ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. М.: Машиностроение, 1983.

Алемасов В.Е., Дрегаллин А.Ф., Тишин А.П. Теория ракетных двигателей. М.: Машиностроение, 1980.

Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей. Кн.1,2/ Под ред. В.М. Кудрявцева. М.: Высш. школа, 1993.

Абутов Д.И., Бобылев В.М. Теория и расчет ракетных двигателей на твердом топливе. М.: Машиностроение, 1987.

Басард Р., Деллауэр Р. Ядерные двигатели для самолетов и ракет. М.: Воениздат, 1967.

Теория и расчет энергосиловых установок космических летательных аппаратов / Л.А. Квасников, Л.А. Латышев, Н.Н. Пономарев-Степной и др. М.: Машиностроение, 2001.

Куландин А.А., Тимашев С.В. Энергетические системы космических летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1979.

Никитин А.Н. Технология сборки двигателей летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1982.

Кузнецов В.А. Ядерные реакторы космических энергетических установок. М.: Атомиздат, 1977.

Раушенбах Г.С. Справочник по проектированию солнечных батарей. М.: Энергаториздат, 1983.

Радиоизотопные источники электрической энергии / В.М. Кодюков, А.И. Рагозинский, А.А. Пустовалов, В.П. Терентьев. М.: Атомиздат, 1978.

Лидоренко Н.С., Мучник Г.Ф. Электрохимические генераторы. М.: Энергоиздат, 1982.

Ушаков Б.А., Никитин В.Д., Емельянов И.Я. Основы термоэмиссионного преобразования энергии. М.: Атомиздат, 1974.

Основы автоматического управления ядерными космическими энергетическими установками / В.В. Бугровский, Н.А. Винцевич, И.М. Вишнепольский и др. М.: Машиностроение, 1974.

Гришин С.Д., Лесков Л.В., Козлов Н.П. Электрические ракетные двигатели. М.: Машиностроение, 1975.

Морозов А.И. Физические основы космических электрореактивных двигателей. М.: Атомиздат, 1978.

Латышев Л.А., Чуян Р.К. Оптимизация параметров ЭРД. М.: Машиностроение, 2000.

Скубачевский Г.С. Авиационные ГТД, конструкция и расчет деталей. 5-е изд. перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1981.

Конструкция и проектирование авиационных газотурбинных двигателей / Д.В. Хронин и др. М.: Машиностроение, 1989.

Жирицкий Г.С., Локай В.И., МаксUTOва М.К. Газовые турбины двигателей летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1971.

Косточкин В.В. Надежность авиационных двигателей и силовых установок. М.: Машиностроение, 1977.

Раздолин М.В., Сурнов Д.И. Агрегаты ВРД. М.: Машиностроение, 1973.

Хронин Д.В. Колебания в двигателях летательных аппаратов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1980.

Конструкция и проектирование жидкостных ракетных двигателей / Г.Г. Гахун и др. М.: Машиностроение, 1989.

Дюнзе Б.В., Жимолихин В.Г. Ракетные двигатели твердого топлива для космических систем. М.: Машиностроение, 1982.

Гуров А.Ф., Сурнов Д.Н., Демидов А.С. Атласы конструкций двигательных и энергетических установок. 1977. Вып. 1—3. / Гипронефтемашиностроение. М., 1977.

Хронин Д.В. Основы автоматизированного проектирования летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1984.

Тунаков А.П. Методы оптимизации при доводке и проектировании двигателей. М.: Машиностроение, 1979.

Шпур Г., Краузе Ф. Автоматизированное проектирование в машиностроении. М.: Машиностроение, 1988.

Евстигнеев М.И. Автоматизация технологических процессов в авиадвигателестроении. М.: Машиностроение, 1982.

Козырев Ю.Г. Промышленные работы. М.: Машиностроение, 1988.

Никитин А.Н., Серебrenников Г.З. Технология сборки и автоматизация производства воздушно-реактивных двигателей. М.: Машиностроение, 1992.

Справочник по балансировке / Под ред. М.Е. Левита. М.: Машиностроение, 1992.

Технология производства двигателей летательных аппаратов / А.М. Сулима и др. М.: Машиностроение, 1996.