

МИНОБРНАУКИ РФ

«Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова»

УТВЕРЖДАЮ

И.о. ректора



В.П. Грахов

24 марта 2017 г.

ПРОГРАММА ВСТУПИТЕЛЬНОГО ИСПЫТАНИЯ
по специальной дисциплине, соответствующей направленности
программы подготовки научно-педагогических кадров в
аспирантуре

Направленность подготовки:

Тепловые, электроракетные двигатели и
энергоустановки летательных аппаратов

Введение

Программа вступительных испытаний при приеме на обучение по программам подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре разработана в соответствии с федеральными государственными образовательными стандартами высшего образования по программам магистратуры 24.04.05 «Двигатели летательных аппаратов»

1 Содержание программы

Программа включает следующие разделы:

- устройство и конструкции двигателей летательных аппаратов;
- термодинамические процессы и процессы теплопередачи в ДЛА;
- механика процессов в двигателях летательных аппаратов;
- теория горения и внутренняя баллистика ДЛА;
- технология двигателей летательных аппаратов;
- вопросы проектирования и САПР двигателей летательных аппаратов.

1.1 Устройство и конструкции ДЛА

1. Введение. Историческая справка о развитии ракетной техники. Роль ракетно-авиационной техники в экономике. Классификация ракетного оружия. Классификация тепловых двигателей. Основы устройства основных типов реактивных двигателей. Области применения. Основные перспективы развития ракетных двигателей. Основные типы компоновочных схем ракет.

2. Рабочее тело теплового двигателя. Рабочее тело двигателя. Основные виды топлив. Физико-химические и эксплуатационные свойства. Топлива ЖРД. Элементарный состав топлив. Реакции горения. Коэффициент избытка окислителя. Термодинамический расчет продуктов сгорания. Ракетные твердые топлива. Баллистическое и смесевое топлива. Топливо для воспламенителя. Горение твердых топлив. Скорость горения, законы горения, единичная скорость горения. Горение заряда заданной формы. Эрозионное горение. Воспламенитель РДТТ. Назначение. Расчет навески. Устройство камер сгорания. Устройство сопла. Потери газа при истечении. Простейшая имитационная модель камеры сгорания РД. Уравнение Бори. Основные стадии работы РД. Устойчивость работы.

3. Система топливоподачи. Основные схемы систем топливоподачи. Основные процессы в камере сгорания. Смесобразование. Распыление. Испарение. Смешение и сгорание. Форсунки. Струйные и центробежные форсунки. Особенности их геометрии.

4. Система охлаждения. Основные виды передачи тепла: теплопроводность, конвекция, излучение. Критерии подобия. Критериальные уравнения. Особенности теплопередачи в РД. Конструкция систем охлаждения РД.

5. Баки. Рабочий запас топлива, гарантийный запас топлива. Неиспользуемое топливо. Устройство топливного бака. Арматура топливного бака. Несущие баки. Основные физические процессы, протекающие в баке. Заборные устройства.

6. Переходные отсеки. Силовой набор корпуса. Обечайки, стрингеры, нервюры, шпангоуты и лонжероны. Ферменные конструкции переходных отсеков. Днища. Стыковочные узлы. Теплозащитные покрытия. Силовой набор корпуса. Обечайки, стрингеры, нервюры, шпангоуты и лонжероны. Ферменные конструкции переходных отсеков. Днища. Стыковочные узлы. Теплозащитные покрытия.

1.2 Термодинамические процессы и процессы теплопередачи в ДЛА

1. Введение. Основные понятия и определения термодинамики. Предмет термодинамики. Метод термодинамики. Термодинамическая система. Параметры состояния. Температура. Давление. Удельный объем. Уравнение состояния. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Идеальные газы и их смеси. Первый закон термодинамики. Внутренняя энергия. Работа и теплота. Теплоемкость. Аналитическое выражение первого закона термодинамики. Энтальпия. Энтропия.

2. Термодинамические процессы идеальных газов. Изобарный, изохорный, изотермический, адиабатический, политропный. Второй закон термодинамики. Формулировка второго закона термодинамики. Прямой и обратный термодинамические циклы. Цикл Карно. Аналитическое выражение второго закона термодинамики. Изменение энтропии в обратимых и необратимых процессах.

3. Циклы энергетических установок. Циклы двигателей внутреннего сгорания. Циклы Отто, Дизеля, Тринклера. Цикл газотурбинных установок. Процессы в компрессионных машинах. Циклы реактивных двигателей. Циклы ПВРД, ВРД, ТРД, ЖРД.

4. Открытые системы. Первый закон термодинамики для открытых систем. Сопла и диффузоры. Основные закономерности течения газа в соплах и диффузорах. Особенности истечения из суживающегося сопла. Критическая скорость. Максимальный секундный расход газа.

5. Теплообмен. Основные понятия и определения. Виды теплообмена. Основной закон теплопроводности. Вывод дифференциального уравнения теплопроводности. Краевые условия. Классификация краевых задач. Методы решения краевых задач.

6. Теплопроводность. Теплопроводность при стационарном режиме. Плоская стенка. Термическое сопротивление. Теплопередача между двумя жидкостями через разделяющую их стенку. Коэффициент теплопередачи. Многослойная плоская стенка. Цилиндрическая стенка. Контактное термическое

сопротивление. Теплопроводность при нестационарном режиме. Общее решение уравнения нестационарной одномерной теплопроводности. Расчет нагрева и охлаждения термически тонких тел. Интегральный метод теплового баланса. Метод Швеца.

7. Конвекция. Ламинарный и турбулентный режимы течения. Основные уравнения теории конвективного теплообмена. Критерии подобия. Физический смысл критериев подобия. Теория подобия применительно к тепловым процессам. Три теоремы подобия. Исследование конвективного теплообмена методами теории пограничного слоя. Вывод уравнений Прандтля. Приближенные методы решений уравнений пограничного слоя. Интегральные уравнения Теодора фон Кармана. Тепловой слой на пластине. Расчет пограничного слоя на плоской пластинке в несжимаемой среде. Связь между трением и теплообменом. Аналогия Рейнольдса. Расчет конвективного теплообмена в цилиндрических и призматических трубах. Основные расчетные формулы и зависимости. Теплообмен при свободной конвекции. Ламинарный перенос тепла на вертикальной пластине. Интегральные уравнения пограничного слоя в случае свободной конвекции. Турбулентный перенос тепла на вертикальной пластине.

8. Лучистый теплообмен. Описание процесса и основные определения. Теплообмен излучением системы тел в прозрачной среде.

1.3 Механика твердых тел и расчеты на прочность

1. Введение. Предмет и содержание курса. Роль расчетов на прочность в современном машиностроении. Задачи курса. Роль российских ученых в современной науке о прочности конструкций.

2. Основные уравнения упругой сплошной среды. Напряженное состояние в точке тела. Тензор и девiator напряжений. Свойства тензора напряжений. Главные напряжения. Дифференциальные уравнения равновесия малого элемента среды. Силовые граничные условия на поверхности тела. Деформированное состояние в точке тела. Связь между перемещениями и деформациями. Уравнения совместности деформаций. Физические уравнения деформируемой среды. Закон Р. Гука. Тензорная форма закона Гука. Альтернативная форма записи закона Гука. Закон Гука для ортотропного материала. Способы решения уравнений теории линейной упругой среды. Решение в перемещениях. Решение в напряжениях. Типы граничных условий. Теорема единственности.

3. Плоская задача теории линейной упругой среды в прямоугольных координатах. Плоская деформация. Плоское напряженное состояние. Функция напряжений. Бигармоническое уравнение для функции напряжений. Его решение. Методы решения плоской задачи. Решение в полиномах. Метод тригонометрических рядов. Метод конечных разностей. Решение

бигармонического уравнения плоской теории упругости методом конечных разностей.

4. Приближенные методы решения задач теории линейной упругости. Внутренняя энергия деформированного линейно-упругого тела. Полная энергия деформируемого тела. Вариационный принцип Ж. Лагранжа. Метод В. Ритца. Основы метода и его применение. Метод Б. Галеркина. Основы метода и его применение.

5. Метод граничных элементов. Основные понятия и определения. Задача Кельвина в случае плоской деформации. Погонные постоянные усилия вдоль отрезка. Численная процедура. Преобразование координат (локальных и глобальных). Коэффициенты влияния. Внутренняя и внешняя задачи. Учет условий симметрии. Вычислительная программа для решения плоских задач теории линейной упругости методом граничных элементов. Структура программы, пример ее применения.

6. Прямоугольные пластины. Классификация пластин. Гипотезы в теории пластин. Связь между перемещениями, деформациями и напряжениями в жестких пластинах. Уравнения равновесия элемента пластины. Дифференциальное уравнение для определения прогиба пластины. Типовые граничные условия. Методы решения дифференциального уравнения для прогиба пластины. Метод тригонометрических рядов: метод Л. Навье, метод М. Леви. Метод Ритца для аналитического приближенного определения напряжений и перемещений в прямоугольных пластинах.

7. Оболочки вращения. Основные понятия и определения. Классификация оболочек. Геометрические свойства поверхностей вращения. Главные радиусы кривизны. Основы теории безмоментных оболочек вращения при осесимметричном нагружении. Условия применения этой теории. Схема нагружения оболочки и ее малого элемента. Внешние нагрузки и внутренние усилия. Уравнения для определения внутренних усилий. Связь деформаций с перемещениями. Физические уравнения для изотропных оболочек. Последовательность определения напряжений, деформаций и перемещений в сферических, цилиндрических, конических и других оболочках.

8. Нагрузки и расчетные случаи. Силовые схемы ракет и особенности их конструкции. Внешние нагрузки, действующие на элементы ракеты. Коэффициенты перегрузки и их применение для определения сил, действующих на элементы конструкции ракеты. Основные расчетные случаи. Коэффициенты безопасности и запаса прочности. Критерии прочности материалов, применяемых в ракетостроении. Определение внутренних усилий в корпусе ракеты. Определение продольных сил и построение их эпюры. Определение перерезывающих сил и изгибающих моментов. Построение их эпюр.

9. Расчет на прочность зарядов двигателей ракет на твердом топливе (РДТТ). Классификация зарядов, их расчетные схемы. Нагрузки. Классификация твердых ракетных топлив (ТРТ), их основные физико-механические характеристики. Расчет свободно-вложенных зарядов, нагруженных давлением продуктов сгорания: нагрузки и допущения, основные расчетные случаи, определение запасов прочности. Учет осевой перегрузки и вращения заряда. Расчет скрепленного заряда, нагруженного давлением продуктов сгорания: нагрузки и допущения, определение контактного давления между зарядом и корпусом, определение основных напряжений и деформаций в заряде. Случай абсолютно жесткого корпуса. Нагрузки на корпус со стороны заряда. Термические напряжения в зарядах: свободно вложенный заряд в случае установившегося потока тепла; скрепленный заряд при известном законе распределения температуры. Концентрация напряжений в зарядах: вкладной щелевой заряд, нагруженный внутренним давлением; скрепленный щелевой заряд, нагруженный внутренним давлением. Температурные напряжения.

10. Прочность корпусов. Прочность корпуса РДТТ. Силовые схемы двигателей. Расчет на прочность корпуса двигателя. Расчет днищ двигателя: днище без отверстий, учет влияния одного или нескольких отверстий. Прочность ЖРД. Камера сгорания ЖРД. Основные нагрузки и расчетные случаи. Критерии оценки прочности камеры сгорания. Запас прочности камеры сгорания по общей несущей способности. Местная прочность камеры сгорания.

1.4 Теория горения и внутренняя баллистика ДЛА

1. Введение. Основные режимы работы ДЛА, их краткая характеристика. Энергетическая характеристика двигателя. Основные этапы развития теории внутренних процессов в ДЛА. Вклад русских ученых в эту отрасль знаний. Современный этап и перспективы развития теории внутрикамерных процессов. Соотношение между теорией и экспериментом на различных этапах развития науки. Основные обозначения.

2. Описание процессов в камере при гипотезе осреднения параметров по объему камеры. Закон сохранения массы для объема двигателя. Приход массы в камеру, обусловленный процессом горения. Расход массы продуктов сгорания через критическое сечение сопла. Коэффициент расхода. Уравнение энергии для камеры сгорания. Приход и расход энергии. Учет теплоотдачи в стенки камеры сгорания. Квазистационарный период работы двигателя. Уравнение Бори. Анализ влияния конструктивных и технологических параметров и условий заряжания на величину давления в двигателе. Показатель степени в степенном законе скорости горения и его влияние на устойчивость работы двигателя. Расчет изменения давления в двигателе на квазистационарном участке работы для различных форм заряда. Нейтральная, прогрессивная и дегрессивная кривые давления.

3. Выход двигателя на стационарный режим работы. Типы воспламенительных устройств и основные требования к ним, пиротехнические составы. Основные стадии процесса воспламенения. Конвективная, кондуктивная и лучистая составляющие теплоотдачи в процессе нагрева топлива. Зажигание топлива в условиях воспламенения. Волновые процессы в двигателе в период воспламенения. Математическая модель выхода двигателя в режим на основе одномерных нестационарных уравнений газовой динамики. Граничные условия на переднем и заднем торцах заряда в зависимости от расположения воспламенителя и скорости газа. Анализ кривых изменения давления и температуры продуктов сгорания в переднем объеме в период воспламенения двигателя. Влияние параметров воспламенителя на процесс воспламенения и переход к устойчивому горению. Заглушка сопла. Ее назначение и влияние на характер изменения кривой давления в двигателе.

4. Горение топлива. Типы топлив, применяемых в твердотопливных двигателях, их состав и механизм горения. Вывод уравнения теплопроводности с учетом реакций распада топлива и взаимодействия с реагентами, диффундирующими из газовой фазы в конденсированную. Тепловой и диффузионный потоки к поверхности горения вкладного и прочноскрепленного с корпусом двигателя зарядов. Экспериментальное определение величины скорости горения как функции давления и температуры заряда. Чувствительность скорости горения к изменению температуры заряда для смесевых и баллистических порохов. Разбросы скорости горения твердого топлива, причины разбросов, выражение для предельного относительного отклонения скорости горения. Воспламенение и погасание топлив. Критические условия воспламенения и погасания. Нестационарная скорость горения. Эрозионная скорость горения. Пороговая скорость обдува горящего топлива. Критерии Победоносцева и Виллюнова. Воспламенение и горение металлических частиц в камере двигателя. Парофазное и гетерогенное горение частиц металла. Образование окислов металлов на поверхности частиц и в окружающем их объеме. Агломерация частиц металла на поверхности топлива. Влияние скорости горения топлива и его состава на процесс агломерации. Распределение по размерам частиц окиси. Горение твердого топлива при перегрузках. Способы регулирования горения.

5. Разбросы параметров рабочего процесса. Разбросы давления в двигателе в период его квазистационарной работы, причины разбросов. Выражение для предельного отклонения давления в двигателе. Разбросы тяги и расходы. Причины отличий в величинах отклонений текущего и среднего за время работы давлений. Сравнительный анализ температурной чувствительности скоростей горения твердого топлива и давления в двигателе.

6. Внутренние процессы в ДЛА на квазистационарном режиме с учетом движения газов. Плотность заряжания, ее влияние на уровень скоростей в камере

двигателя. Стационарные одномерные уравнения газовой динамики для канала заряда при наличии эрозионного горения и деформации заряда. Граничные условия для них. Методы их решения. Влияние на кривую давления плотности заряжания и эрозионного горения. Перепад давления по каналу заряда, его зависимость от соотношения площадей канала и критического сечения сопла. Застойные зоны. Процессы в застойных зонах. Назначение в застойных зонах. Особенности протекания внутрикамерных процессов во вращающихся двигателях и при наличии перегрузок.

1.5 Технология ДЛА

1. Машиностроение и его роль в научно-техническом прогрессе.
2. Конструкционные материалы, применяемые в двигателестроении.
3. Основные понятия и определения.
4. Основы базирования деталей и заготовок.
5. Формирование качества деталей, обрабатываемых на металлорежущих станках.
6. Задача оптимизации технологических процессов.
7. Технологические методы снижения себестоимости изделий.
8. Исходная информация и последовательность проектирования технологического процесса изготовления машины.
9. Основы проектирования технологического процесса изготовления деталей.
10. Основные этапы проектирования единичного технологического процесса механической обработки заготовки.
11. Проектирование типовых и групповых технологических процессов.
12. Области и условия рационального применения технологических процессов.
13. Оборудование и технологическая оснастка групповой обработки. Проектирование групповых технологических процессов и групповых поточных линий.
14. Особенности разработки технологических процессов обработки деталей на станках с программным управлением.
15. Обработка отверстий.
16. Обработка деталей абразивными инструментами. Особенности обработки абразивным инструментом. Основные методы шлифования металлов.
17. Отделочные виды обработки
18. Обработка резьбовых поверхностей.
19. Обработка зубчатых поверхностей и шлицевых соединений.
20. Технологические методы повышения надежности и долговечности деталей машин.
21. Технологичность конструкции деталей, узлов и изделия в целом
22. Перспективы развития технологии машиностроения

1.6 Проектирование ДЛА, САПР

1. Общие вопросы проектирования. Связь внутри- и внешнебаллистических параметров. Анализ процесса проектирования. Критерии сравнительного анализа. Выбор конструктивной схемы. Выбор рабочего давления.

2. Проектирование топливных зарядов. Выбор топлива. Требования, предъявляемые к топливным зарядам. Основные закономерности выгорания топлива. Выбор формы заряда. Определение геометрических размеров заряда.

3. Проектирование корпуса РДТТ. Выбор материалов корпусных деталей. Выбор формы и расчет корпусных деталей и узлов.

4. Проектирование сопловых блоков. Выбор типа сопла. Построение геометрического контура сопла. Определение газодинамических и тепловых параметров по контуру сопла. Оценка потерь удельного импульса. Некоторые способы оптимизации контуров сопловых блоков.

5. Проектирование теплозащитных покрытий. Определение тепловых потоков в конструкцию двигательной установки. Выбор теплозащитных материалов. Определение толщины покрытий.

6. Проектирование органов регулирования. Характеристика вариантов регулирования РДТТ. Предстартовое регулирование разбросов основных характеристик РДТТ. Предстартовое регулирование уровня рабочих параметров. Программированное регулирование параметров РДТТ. Регулирование вектора тяги РДТТ в полете.

7. Перспективы развития РДТТ.

8. Общие вопросы автоматизации проектирования. Проблемы автоматизированного проектирования и изготовления. Проектирование с помощью ЭВМ. История развития САПР. ЭВМ, вычислительные сети, сетевые устройства. Основные принципы построения САПР, принципы интерактивного проектирования. Внутримашинное представление объектов проектирования. Структура САПР, техническое обеспечение САПР, системное математическое обеспечение САПР, прикладное программное обеспечение. Формализация процесса конструирования и технологического обеспечения. Математическое моделирование в САПР. Математические модели структурного анализа, математические модели проектного анализа, модели, основанные на применении методов математического программирования, математические модели проверочного анализа, численный эксперимент. Проектирование оптимальных конструкций РД.

9. Состав ПО САПР, состав и функции общесистемного ПО САПР. Принципы интерактивного проектирования. Описание типичной САПР. Подсистемы САПР РД. Информационные модели РД, узлов, агрегатов и элементов РД. Системы баз данных. Обработка данных. Интегрированные системы конструирования и технологий. Автоматизированные конструкторские технологические бюро.

2 Вопросы для подготовки к вступительному испытанию

1. Физико-химические и эксплуатационные свойства жидких топлив. Термодинамический расчет продуктов сгорания.
2. Ракетные твердые топлива. Баллиститные и смесевые топлива. Горение твердых топлив. Скорость горения, законы горения, единичная скорость горения. Эрозионное горение.
3. Основные виды передачи тепла: теплопроводность, конвекция, излучение. Критерии подобия. Критериальные уравнения. Особенности теплопередачи в РД.
5. Теплообмен. Основные понятия и определения. Виды теплообмена. Основной закон теплопроводности.
6. Расчет на прочность зарядов двигателей ракет на твердом топливе (РДТТ). Классификация зарядов, их расчетные схемы. Нагрузки.
7. Расчет свободно-вложенных зарядов, нагруженных давлением продуктов сгорания: нагрузки и допущения, основные расчетные случаи, определение запасов прочности. Учет осевой перегрузки и вращения заряда.
8. Расчет скрепленного заряда, нагруженного давлением продуктов сгорания: нагрузки и допущения, определение контактного давления между зарядом и корпусом, определение основных напряжений и деформаций в заряде.
9. Выход двигателя на стационарный режим работы. Типы воспламенительных устройств и основные требования к ним, пиротехнические составы. Основные стадии процесса воспламенения.
10. Математическая модель выхода двигателя в режим на основе одномерных нестационарных уравнений газовой динамики. Граничные условия на переднем и заднем торцах заряда в зависимости от расположения воспламенителя и скорости газа.
11. Внутренние процессы в ДЛА на квазистационарном режиме с учетом движения газов. Плотность заряжания, ее влияние на уровень скоростей в камере двигателя. Стационарные одномерные уравнения газовой динамики для канала заряда при наличии эрозионного горения и деформации заряда. Граничные условия для них. Методы их решения.
12. Конструкционные материалы, применяемые в двигателестроении.
13. Технологические методы повышения надежности и долговечности деталей машин.
14. Проектирование органов регулирования. Характеристика вариантов регулирования РДТТ. Предстартовое регулирование разбросов основных характеристик РДТТ. Предстартовое регулирование уровня рабочих параметров.
15. Программированное регулирование параметров РДТТ. Регулирование вектора тяги РДТТ в полете.

16. Основные принципы построения САПР, принципы интерактивного проектирования. Внутримашинное представление объектов проектирования. Структура САПР, техническое обеспечение САПР, системное математическое обеспечение САПР, прикладное программное обеспечение.
17. Математическое моделирование в САПР. Математические модели структурного анализа, математические модели проектного анализа, модели, основанные на применении методов математического программирования, математические модели проверочного анализа, численный эксперимент.

3 Список рекомендуемой литературы

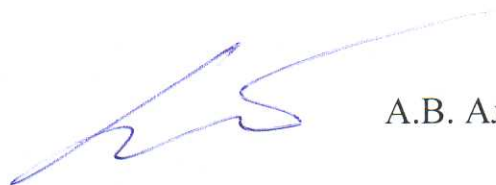
3.1 Основная литература

1. Ерохин Б.Т. Теория и проектирование ракетных двигателей. – СПб.: Лань, 2015. – 508 с.
2. Дорофеев А.А. Основы теории тепловых ракетных двигателей. – М.: изд МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2014. – 571 с.
3. Добровольский М.В. Жидкостные ракетные двигатели – М.: изд МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2005. – 488 с.
4. Внутренняя баллистика РДТТ / А.В. Алиев и др.; Под ред. А.М. Липанова, М.Ю. Милехина. – М.: Машиностроение, 2007. – 506 с.
5. Твёрдотопливные регулируемые двигательные установки / Ю.С. Соломонов, А.М. Липанов, А.В. Алиев и др.; Под ред. А.М. Липанова, Ю.С. Соломонова. – М.: Машиностроение, 2012. – 416 с.

3.2 Дополнительная литература

1. Липанов А.М., Алиев А.В. Проектирование РДТТ. – М.: Машиностроение, 1995. – 399 с.
2. Конструкция ракетных двигателей на твердом топливе / Л.Н. Лавров, А.А. Болотов, В.И. Гапаненко и др. Под ред. Л.Н. Лаврова. – М.: Машиностроение, 1993. – 215 с.
3. Фахрутдинов И.Х. Ракетные двигатели твердого топлива. - М.: Машиностроение, 1973. – 384 с.
4. Алемасов В.Е., Дрегаллин А.Ф., Тишин А.П. Теория ракетных двигателей / Под ред. В.Е. Алемасова. – М.: Машиностроение, 1989. – 464 с.
5. Прочность ракетных конструкций: Учебное пособие для машиностр. спец. Вузов / В.И. Мосаковский, А.Г. Макаренков, Г.И. Никитин и др.; Под ред. В.И. Мосаковского. – М.: Высшая школа, 1990. – 359 с.

Руководитель направления,
д.ф-м.н., профессор



А.В. Алиев