

**ПРОГРАММА ВСТУПИТЕЛЬНОГО ИСПЫТАНИЯ  
ПО КОНКУРСНОЙ ГРУППЕ «ФАКТ МАШИНОСТРОЕНИЕ»  
ДЛЯ ПОСТУПАЮЩИХ В АСПИРАНТУРУ**

Вступительное испытание проводится в форме собеседования.

Собеседование состоит из двух частей:

- собеседование по содержанию будущей диссертационной работы, планируемой к выполнению абитуриентом с научным руководителем – в соответствии с частью I настоящей Программы;
- собеседование по общетеоретическим вопросам выбранной направленности обучения – в соответствии с частью II настоящей Программы.

**ЧАСТЬ I**

**Вопросы по планируемой диссертационной работе поступающего**

1. Планируемая тема работы, информация о научном руководителе, ожидаемые результаты, научная новизна и практическая ценность (при наличии);
2. Основные результаты выпускной работы в магистратуре или специалитете, характеризующие научный задел для кандидатской диссертации;
3. Информация о имеющихся публикациях и другой апробации результатов выпускной работы в магистратуре или специалитете.

**Направленность 2.5.14**

**Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов**

**ЧАСТЬ II**

**1. Динамика конструкций и прочность летательных аппаратов (ЛА)**

- 1.1. *Основы механики твердого деформируемого тела.* Кинематика деформируемой среды. Эйлеровы и Лагранжевы координаты. Перемещения. Малые и конечные деформации. Выражение деформаций через перемещение. Напряжения. Дифференциальные уравнения равновесия и движения. Граничные условия. Физические законы деформирования. Обобщенный закон Гука для изотропных и анизотропных материалов с учетом температуры. Модели и законы деформирования для пластического, упруго – пластического и вязко – упругого тел. Формулировка краевых задач статики и динамики деформируемого тела. Потенциальная энергия деформации линейно – упругого тела. Вариационные принципы Лагранжа, Даламбера – Лагранжа, Кастильяно. Смешанный вариационный принцип. Теоремы взаимности, Клапейрона, Кастильяно. Вариационные методы Ритца, Бубнова-Галеркина, Трефца, конечных элементов (КЭ). Плоская деформация и плоское напряженное состояние. Бигармоническое уравнение для функции напряжений. Кручение призматических стержней. Уравнение для функции касательных напряжений. Вариационные и численные методы решения задач плоского напряженного состояния и кручения.

- 1.2. *Прикладные модели и методы расчета тонкостенных элементов конструкций.* Изгиб тонких пластин; дифференциальное уравнение для функции прогиба и граничные условия; вариационная формулировка задачи; вариационные и численные методы решения (методы Ритца, Бубнова – Галеркина, Власова – Канторовича, конечных элементов, конечных разностей). Теория пологих оболочек: формулировка задачи в перемещениях и в смешанной форме (для функции прогиба и функции напряжений); вариационные и численные методы решения. Геометрически нелинейная теория изгиба пластин и пологих оболочек. Уравнения в перемещениях и в смешанной форме. Основные соотношения и уравнения общей теории оболочек. Оболочки вращения: использование разложений в ряды Фурье; численное интегрирование обыкновенных дифференциальных уравнений; применение метода КЭ (МКЭ), когда в качестве КЭ рассматриваются кольцевые полоски. Осесимметричная и антисимметричная деформация оболочки вращения: безмоментное состояние; краевой эффект. Полубезмоментная теория цилиндрических оболочек. Растяжение, изгиб, сдвиг и кручение цилиндрических и слабokonических подкрепленных оболочек с произвольным контуром поперечных сечений: «балочная» теория при свободной деформации поперечных сечений; применение вариационных методов расчета в перемещениях и напряжениях при стеснении деформаций. Стесненное кручение тонкостенных стержней открытого профиля. Применение МКЭ к расчету напряженно-деформированного состояния составных тонкостенных конструкций: деление конструкции на КЭ; модели деформирования и аппроксимации для КЭ; обобщенные координаты конечно-элементной модели конструкции; условия сопряжения КЭ; составление уравнений равновесия в обобщенных координатах; редуцирование больших систем (методы суперэлементов и подконструкций).
- 1.3. *Устойчивость элементов конструкции.* Статический и энергетический критерии устойчивости. Устойчивость стержней. Устойчивость пластин при сжатии и сдвиге. Линеаризованные уравнения устойчивости оболочек. Устойчивость цилиндрической оболочки при осевом сжатии и при внешнем давлении. Нелинейное деформирование и критические нагрузки «прощелкивания» пологих панелей. Устойчивость стержней и пластин за пределом упругости. Применение вариационных и численных методов для расчета критических нагрузок потери устойчивости упругих элементов конструкций.
- 1.4. *Динамика конструкций летательных аппаратов.* Колебания упругой конструкции как системы конечным числом степеней свободы. Уравнения малых колебаний в обобщенных координатах. Собственные колебания. Уравнения в нормальных координатах и их решения. Использование «балочных» моделей без учета и с учетом поперечных сдвигов для расчета колебаний удлиненных конструкций типа корпуса ракеты, фюзеляжа и крыла; применение метода Ритца и МКЭ для получения уравнений колебаний конструкции в виде системы с конечным числом степеней свободы. Использование моделей в виде эквивалентных анизотропных пластин без учета и с учетом поперечных сдвигов для расчета колебаний крыльев малого удаления. Применение МКЭ для расчета колебаний нерегулярных тонкостенных конструкций ЛА. Продольные и поперечные колебания ракеты с отсеками и баками, частично заполненными жидкостью; формулировка задачи гидроупругости и методы ее решения; уравнения в обобщенных координатах. Задачи аэроупругости. Местный угол атаки и приращение аэродинамического давления на колеблющейся несущей поверхности. Уравнения аэроупругости колебаний самолета; метод Ритца. Условия аэроупругой неустойчивости (флаттер и дивергенция). Приближенный метод расчета критической скорости изгибно-крутильного флаттера крыла большого удлинения (при использовании балочной теории изгиба и кручения, гипотез стационарности и плоского обтекания нормальных сечений крыла). Колебания упругих ЛА с учетом

управляющих сил (отклонений органов управления) с обратными связями системы управления; формулировка задачи автоупругости; уравнения динамики замкнутой системы; анализ динамической устойчивости.

- 1.5. *Прочность агрегатов ЛА.* Нагрузки, действующие на ЛА в полете; зависимость их от кинематических параметров движения. Перегрузка и коэффициент безопасности. Нагрев конструкций. Нормированные расчетные случаи нагружения. Влияние упругости на распределение аэродинамических нагрузок. Расчет на прочность крыльев большого удлинения и фюзеляжей с учетом пластических деформаций и потери устойчивости элементов; применение «балочной» теории и метода редуцированных коэффициентов. Расчет на прочность и местную устойчивость оболочек корпусов, топливных баков, гермокабин. Учет краевых изгибов в местах соединения оболочек с упругими шпангоутами. Применение МКЭ к расчету напряженно-деформированного состояния и устойчивости конструкций ЛА. Основы механики разрушения и накопления повреждений. Усталость и ресурс конструкций. Оптимальное проектирование конструкций ЛА по условию минимума массы с учетом ограничений по прочности, жесткости и устойчивости.

## 2. Основы теории теплопередачи

- 2.1. *Теплопроводность при стационарном режиме.* Основное дифференциальное уравнение теплопроводности. Условия однозначности. Простейшие задачи стационарной теплопроводности в твердых телах – плоской, цилиндрической и шаровой стенках, теплопроводность стержня конечной и бесконечной длины, задача о распределении температуры в ребре прямоугольной формы. Теплопроводность при наличии объемного тепловыделения в бесконечной плоской пластине.
- 2.2. *Теплопроводность при нестационарном режиме.* Методы решения краевых задач нестационарной теплопроводности. Аналитические методы: метод разделения переменных, метод функции Грина, принцип Дюамеля, тепловые потенциалы, интегральные преобразования, операционные методы, методы решения вариационных задач теплопроводности (методы Ритца, Канторовича, Био, Бубнова-Галеркина). Численные методы. Разностные схемы и сеточные уравнения. Принципы построения разностных схем. Явные и неявные схемы. Аппроксимация, сходимости и устойчивость разностных схем. Консервативные схемы. Численное решение одномерных параболических уравнений в областях с фиксированными и подвижными границами. Решение задачи типа Стефана. Численное решение многомерных задач теплопроводности. Методы переменных направлений и расщепления.
- 2.3. *Конвективный теплообмен.* Уравнения конвективного теплообмена. Подобие физических явлений. Теоремы подобия. Критерии гидродинамического и теплового подобия. Понятия о критериальных уравнениях. Связь между теплопередачей и трением. Понятия о пограничном слое. Критериальное уравнение теплопередачи и канала. Теплопередача при свободном движении в гравитационном поле массовых сил. Особенности теплопередачи в химически реагирующем газе.
- 2.4. *Теплообмен излучением.* Физический механизм испускания излучения. Излучательные свойства абсолютно черного тела: интенсивность и направленная сила излучения, плотность потока излучения, формула Планка, функции излучения абсолютно черного тела, закон смещения Вина, закон излучения Вина, закон Рэлея-Джинса, закон Стефана-Больцмана. Теплообмен излучением между черными изотермическими поверхностями: понятие углового коэффициента, свойство взаимности, свойство эквивалентности, свойство замкнутости, алгебра угловых коэффициентов, методы определения угловых коэффициентов. Радиационные свойства реальных материалов: степень черноты, поглощательная и отражательные способности, понятия о диффузной, серой, селективной и диффузо-зеркальной поверхностях, закон

Кирхгофа, определение радиационных свойств с помощью классической электромагнитной теории, влияние шероховатости и загрязнения поверхности на ее радиационные свойства, радиационные характеристики специальных поверхностей. Зональный метод расчета теплообмена излучением в системе диффузных тел (метод лучистого сальдо). Особенности теплообмена излучением в излучающих, поглощающих и рассеивающих средах: уравнение переноса излучения, радиационное равновесие, уравнение переноса излучения для плоскопараллельного случая. Понятие о радиационной, яркостной и цветовой температуре. Основные особенности контактного теплообмена. Контактное термическое сопротивление.

- 2.5. *Обратные задачи теплообмена и методы их решения.* Постановка обратных задач теплообмена. Обратные задачи теплопроводности (ОЗТ). Восстановление тепловых граничных условий и определение теплофизических характеристик из решения обратных задач. Роль обратных задач при разработке, обосновании и коррекции математических моделей процессов тепломассообмена. Некорректность обратных задач и регуляризации по Тихонову. Приближенно-аналитические методы решения ОЗТ. Экстремальные постановки обратных задач и методы их решения. Регуляризация итерационных методов решения обратных задач.

## Литература

1. Авдонин А.С., Фигуровский В.И. Расчет на прочность летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1985.
2. Балабух Л.И., Алфутов Н.А., Усюкин В.И. Строительная механика ракет. М.: Высш. школа, 1984.
3. Безухов Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести. М.: Высш. школа, 1968.
4. Аэрогидроупругость конструкций / А.Г. Горшков, В.И. Морозов, А.Т. Пономарев, Ф.Н. Шклярчук. М.: Физматлит, 2000.
5. Колесников К.С. Динамика ракет. М.: Машиностроение, 1980.
6. Строительная механика летательных аппаратов / И.Ф. Образцов, Л.А. Булычев, В.В. Васильев и др. М.: Машиностроение, 1986.
7. Образцов И.Ф., Савельев Л.М., Хазанов Х.С. Метод конечных элементов в задачах строительной механики летательных аппаратов. М.: Высш. школа, 1985.
8. Усюкин В.И. Строительная механика конструкций космической техники. М.: Машиностроение, 1988.
9. Авдуревский В.С. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике. М.: Машиностроение, 1975.
10. Агафонов В.П., Вертушкин В.К. Неравновесные физико-химические процессы в аэродинамике. М.: Машиностроение, 1972.
11. Алифанов О.М. Идентификация процессов теплообмена летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1979.
12. Белов С.В. Пористые металлы в машиностроении. М.: Машиностроение, 1981.
13. Беляев Н.М. Методы теории теплопроводности. М.: Высш. школа, 1982.
14. Залетаев В.М., Капинос Ю.В. Расчет теплообмена космического аппарата. М.: Машиностроение, 1979.
15. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высш. школа, 1967.

16. Моделирование тепловых режимов космического аппарата и окружающей его среды / Под ред. Г.И. Петрова. М.: Машиностроение, 1971.
17. Фаврский О.Н., Каданер Я.С. Вопросы теплообмена в космосе. М.: Высш. школа, 1972.
18. Дмитриев В.Г., Чижов В.М. Основы прочности и проектирование силовой конструкции летательных аппаратов – М.:2005. – 416 с.
19. Гришин В.И., Дзюба А.С., Дударьков Ю.И. Прочность и устойчивость элементов и соединений авиационных конструкций из композитов. – М.: Издательство физико-математической литературы, 2013. – 272 с.

## **Направленность 2.5.12.**

### **Аэродинамика и процессы теплообмена летательных аппаратов**

#### **ЧАСТЬ II**

##### **1. Основы теоретической аэродинамики**

- 1.1. *Силовое воздействие среды на движущиеся тела. Основные понятия, определения, гипотезы.* Движение летательных аппаратов (ЛА) в сплошной среде, силовое воздействие среды. Основные параметры газа, характеризующие его состояние. Сжимаемость газа. Вязкость. Гипотеза сплошности. Главный вектор аэродинамических сил, момента, понятие о центре давления. Общее выражение для аэродинамической силы (теория размерностей и подобия), аэродинамических коэффициентов сил и моментов. Критерии подобия. Числа  $M$  и  $Re$ . Напряжение трения. Гипотезы турбулентности. Общая характеристика аэродинамических коэффициентов.
- 1.2. *Основные уравнения сохранения аэродинамики.* Методы исследования движения газа. Методы Лагранжа, Эйлера. Понятие линии тока и траектории движения. Движение жидкой частицы. Потенциальное и вихревое течения. Теорема Гельмгольца. Основные уравнения аэродинамики. Исследуемая система физических тел. Модели жидкости (газа). Уравнения неразрывности для  $i$ -й компоненты газа (для смеси). Интегральная и дифференциальная формы записи. Уравнение Навье—Стокса. Дифференциальные уравнения движения невязкой жидкости (уравнения Эйлера). Уравнения энергии для конечного и бесконечно малого объемов. Удельная энергия вдоль линии тока для невязкой жидкости в условиях адиабатического течения. Обобщенная форма записи уравнений сохранения аэрогазодинамики. Уравнение состояния совершенного и реального газа. Интегралы уравнения движения. Система основных уравнений. Начальные и граничные условия. Современные численные методы решения уравнений Эйлера, Навье—Стокса и их асимптотических моделей.
- 1.3. *Одномерное изэнтропическое установившееся течение газа.* Распределение малых возмущений в газовой среде. Соотношение между скоростью течения газа и площадью сечения. Параметры газа при изэнтропическом течении. Относительные скорости и их взаимосвязь. Критические значения параметров. Влияние сжимаемости на давление торможения. Газодинамические функции.
- 1.4. *Теория скачков уплотнения.* Природа ударных волн – скачков уплотнения. Схемы расчета параметров потока на скачке уплотнения. Теория прямого скачка уплотнения. Система основных уравнений для случая постоянных теплосемкостей. Расчет параметров газа после скачка уплотнения. Процессы ударного и изэнтропического сжатия. Изменение энтропии на скачке уплотнения. Параметры торможения за прямым скачком уплотнения. Теория косоугольного скачка уплотнения (постоянные теплосемкости). Система основных уравнений. Угол наклона фронта скачка уплотнения. Скорость, давление, плотность, температура за скачком уплотнения.

Ударная поляра. Система уравнений и алгоритм расчета параметров потока за скачком уплотнения с учетом физико-химических превращений. Влияние физико-химических превращений в газе на параметры течения за скачком уплотнения. Отражение скачков уплотнения от твердой и свободной границ. Взаимодействие скачков уплотнения. Взаимодействие скачков уплотнения с волной разрежения.

- 1.5. *Методы характеристик и линеаризации.* Основное кинематическое уравнение аэродинамики и методы его решения. Метод характеристик. Задача Коши. Характеристики в плоскостях потока и годографа скорости. Свойства характеристик. Решение уравнений характеристик в плоскости годографа скорости. Типичные задачи, решаемые методом характеристик. Численное и графическое решение задач. Обтекание сверхзвуковым потоком изломов поверхностей (течение Прандтля-Майера).

Теория малых возмущений. Линеаризация основных уравнений динамики идеального газа. Решения линеаризованных уравнений газовой динамики.

- 1.6. *Вихревое и потенциальное движение идеальной несжимаемой среды.* Вихревые движения в идеальной сплошной среде. Понятие о циркуляции скорости. Теорема Стокса. Теорема Кельвина. Теорема Гельмгольца. Определение поля скоростей по заданному полю вихрей. Обобщение поля Био-Савара. Скорости, индуцированные вихрем (отрезком вихревого шнура, вихревым кольцом). Взаимодействие вихря с движущейся средой. Плоское потенциальное движение идеальной несжимаемой среды.

Метод потенциальных потоков. Комплексный потенциал и комплексная скорость. Связь плоской и гидродинамической задачи с теорией функций комплексного переменного. Простейшие плоские потенциальные потоки (прямолинейный равномерный поток, течение внутри прямого угла, источник и сток, диполь, вихрь). Бесциркуляционное и циркуляционное обтекания круглого цилиндра. Парадокс Эйлера-Даламбера. Силы и моменты, действующие на цилиндр правильной формы. Формулы Жуковского-Чаплыгина.

- 1.7. *Пограничный слой.* Дифференциальное уравнение ламинарного пограничного слоя. Ламинарный пограничный слой на плоской пластине в несжимаемом потоке и при больших скоростях. Ламинарный пограничный слой при градиенте давления. Слабое и сильное взаимодействие. Учет эффектов второго порядка. Приближенные методы расчета ламинарного пограничного слоя. Переход ламинарного пограничного слоя в турбулентный. Турбулентный пограничный слой. Уравнения осредненного турбулентного пограничного слоя. Напряжение Рейнольдса. Отрыв ламинарного и турбулентного слоя. Методы экспериментального исследования перехода и отрыва.
- 1.8. *Аэродинамика гиперзвуковых скоростей и разреженного газа.* Общие свойства гиперзвуковых течений. *Гиперзвуковая* теория малых возмущений. Гиперзвуковая теория Ньютона-Буземана. Влияние физико-химических процессов на обтекание затупленных тел сверхзвуковым и гиперзвуковым потоками. Понятие равновесных, неравновесных и «замороженных» течений. Характерные особенности течений слабо разреженного газа. Свободномолекулярное обтекание тел. Число Кнудсена. Модели взаимодействия свободномолекулярного потока с летательным аппаратом.

## **2. Аэродинамика летательных аппаратов**

- 2.1. *Аэродинамика крыла.* Профиль и крыло конечного размаха в потоке несжимаемой жидкости. Теория тонкого профиля. Аэродинамические характеристики профилей. Крыло конечного размаха в потоке несжимаемой жидкости. Теория вихревой несущей нити. Теория несущей поверхности. Расчет аэродинамических характеристик при больших углах атаки. Особенности распределения нагрузки на крыльях разной формы

в плане. Теоретические и экспериментальные исследования тонких крыльев малого удлинения при больших углах атаки с учетом отрыва потока.

Профиль и крыло в дозвуковом потоке сжимаемого газа. Линейная теория крыла. Связь между аэродинамическими характеристиками крыла в сжимаемом и несжимаемом потоках.

Профиль и крыло при околосвуковой скорости. Критическое число Маха. Законы подобия при околосвуковых течениях. Аэродинамические характеристики профилей и крыльев при околосвуковых скоростях.

Профиль и крыло в сверхзвуковом потоке. Тонкая пластина в сверхзвуковом потоке. Линейная теория тонкого профиля и крыла конечного размаха в сверхзвуковом потоке. Метод особенностей. Тонкий профиль в гиперзвуковом потоке. Аэродинамические характеристики крыльев при сверхзвуковой скорости.

Аэродинамические характеристики крыльев и оперений с отклоненными рулевыми поверхностями. Аэродинамические характеристики крыльев с механизацией. Влияние формы крыла на эффективность механизации. Аэродинамические характеристики оперения при отклоненных рулях. Шарнирные моменты рулевых поверхностей.

2.2. *Аэродинамика корпуса летательного аппарата.* Корпус летательного аппарата при дозвуковых и сверхзвуковых скоростях. Аэродинамические характеристики корпусов при дозвуковой скорости. Обтекание при околосвуковой скорости. Критическое число Маха. Аэродинамические характеристики корпусов при околосвуковой скорости. Конус в сверхзвуковом потоке. Затупленный конус в сверхзвуковом потоке. Заостренное тело в сверхзвуковом потоке. Затупленное тело вращения в сверхзвуковом потоке. Аэродинамические характеристики корпусов и мотогондол с воздухозаборниками. Обтекание затупленных тел гиперзвуковым потоком. Влияние свойств реального газа на аэродинамические характеристики тел при гиперзвуковой скорости.

2.3. *Аэродинамическая интерференция.* Природа аэродинамической интерференции. Подъемная сила комбинации корпуса и крыла. Влияние угла крена на интерференцию между корпусом и крылом. Крестообразная комбинация. Интерференция между крылом и оперением. Органы управления. Аэродинамический расчет рулей.

Аэродинамические характеристики летательного аппарата. Подъемная сила, лобовое сопротивление. Поляры первого и второго рода. Моменты тангажа и рыскания. Момент крена. Аэродинамические характеристики летательного аппарата со взлетно-посадочной механизацией. Влияние земли.

2.4. *Аэродинамические характеристики несущих винтов вертолета и пропеллеров.* Несущий винт в режимах вертикального взлета и снижения. Режим вихревого кольца. Самовращение. Несущий винт в режимах косоугольного обтекания. Сила тяги, пропульсивная сила, мощность. Маховое движение лопастей. Обдувка корпуса вертолета несущим винтом. Способы создания управляющих моментов. Идеальный пропеллер. Критерии подобия. Винтовые диаграммы. Взаимозависимость между силой тяги и мощностью. Полетный и относительный КПД реального винта. Вихревая теория пропеллера. Соосные винты.

### 3. Процессы теплообмена летательных аппаратов

3.1. *Трение и теплообмен.* Ламинарный теплообмен при высоких скоростях и температурах. Законы подобия в задачах теплообмена. Интегральные характеристики пограничного слоя. Теплообмен при малых скоростях в пограничном слое

несжимаемой жидкости. Коэффициенты теплоотдачи при больших скоростях. Связь между трением и теплоотдачей. Переход ламинарного течения в турбулентное. Турбулентный теплообмен при высоких скоростях и температурах. Приближенные теории турбулентного движения. Приближенные методы расчета теплообмена в турбулентном пограничном слое.

Теплообмен при химических реакциях в пограничном слое. Дифференциальные уравнения диффузии для ламинарного пограничного слоя в смеси реагирующих газов. Уравнение энергии. Химически равновесный пограничный слой. Химически неравновесное течение на каталитической стенке. Расчет теплообмена в реагирующем газе.

Теплообмен на поверхности летательных аппаратов при трехмерном обтекании. Течение в трехмерном пограничном слое. Дифференциальное уравнение трехмерного пограничного слоя. Линии растекания. Расчет теплообмена при трехмерном ламинарном течении в пограничном слое. Совместное влияние вдува и шероховатости на теплообмен. Течение в открытых зонах. Пограничные слои в неоднородном внешнем потоке.

Теплообмен в разреженном газе. Теория теплообмена в разреженном газе. Режимы тепловых и динамических процессов. Теплообмен в свободномолекулярной и переходной областях течения.

Методы экспериментального исследования теплообмена.

- 3.2. *Теплопередача в элементах конструкций летательных аппаратов.* Основные понятия и уравнения теории теплопроводности. Краевые условия в задачах теплопроводности. Методы решения задач теплопроводности. Аналитические методы. Численное решение задачи теплопроводности. Моделирование температурных полей. Перенос тепла излучения к летательным аппаратам и внутри элементов конструкции. Основные определения и уравнения теплообмена излучением. Методы решения уравнений переноса излучения. Теплообмен излучением внутри поглощающей, излучающей и рассеивающей среды. Температурные поля в тонкостенных летательных аппаратах. Нагрев и охлаждение тела с одинаковой по объему температурой. Аэродинамический нагрев обшивки. Неравномерное распределение температуры по поверхности тонкостенной конструкции. Температурные поля в подкрепленных конструкциях.
- 3.3. *Тепловая защита летательных аппаратов.* Методы тепловой защиты. Типы теплозащитных материалов. Перенос тепла внутри теплозащитных покрытий. Термическое сопротивление слоя термоизоляции. Нестационарная теплопроводность в многослойных конструкциях. Приближенные методы расчета нагрева тонкостенных конструкций с термоизоляцией. Аэротермохимическое разрушение термоизоляции. Методы экспериментального исследования теплозащитных покрытий и материалов, применяемых в летательных аппаратах, в условиях интенсивного теплового воздействия. Методы и особенности тепловых испытаний конструкций летательных аппаратов.

### Основная литература

1. Аэрогидромеханика: Учеб. для вузов / Е.Н. Бондарев, В.Т. Дубасов, Ю.А. Рыжов и др. М.: Машиностроение, 1993.



2. Зарубин В.С. Температурные поля в конструкциях летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1978.
3. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. Т. 1, 2. М.: Физматгиз, 1963.
4. Краснов Н.Ф. Аэродинамика. Ч. 1, 2. М.: Высш. школа, 1980.
5. Краснов Н.Ф. Основы аэродинамического расчета. М.: Высш. школа, 1981.
6. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1973.
7. Лунев В.В. Гиперзвуковая аэродинамика. М.: Машиностроение, 1975.
8. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высш. школа, 1967.
9. Основы прикладной аэрогазодинамики. Ч. 1, 2 / Н.Ф. Краснов и др. М.: Высш. школа, 1991.
10. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике / Под ред. В.К. Кошкина. М.: Машиностроение, 1975.
11. Тепловая защита / Ю.В. Полежаев и др. М.: Энергия, 1976.
12. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Иностран. л-ра., 1975.

### **Направленность 2.5.16.**

#### **Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов**

#### **ЧАСТЬ II**

#### **1. Теория автоматического регулирования и управления**

- 1.1. Решение дифференциальных уравнений состояния линейных систем. Переходная матрица и матричная переходная функция.
- 1.2. Управляемость линейных систем с постоянными параметрами. Каноническая форма управляемости. Стабилизируемость. Матричная передаточная функция и частотная характеристика системы.
- 1.3. Связь импульсной переходной функции, передаточной функции и частотной характеристики системы. Нули и полюсы матричных передаточных функций.
- 1.4. Устойчивость автоматических систем. Алгебраические критерии устойчивости. Граница устойчивости.
- 1.5. Критерий Рауса-Гурвица. Критерий Михайлова и Найквиста.
- 1.6. Оптимальное восстановление состояния линейных систем. Оптимальные наблюдатели.
- 1.7. Стохастический подход к задаче наблюдения. Интегральная квадратичная форма как мера оптимального наблюдателя.
- 1.8. Дифференциальное уравнение для матрицы дисперсий ошибки восстановления. Структура и установившиеся свойства оптимального наблюдателя.
- 1.9. Детерминированная задача линейного оптимального управления. Постановка задачи оптимизации. Интегральный квадратичный критерий оптимальности.
- 1.10. Дифференциальное уравнение для матрицы оптимальных коэффициентов усиления. Стохастические задачи линейного оптимального регулирования.
- 1.11. Синтез стохастического линейного оптимального регулятора. Структура оптимального регулятора.

**2. Классическое вариационное исчисление.**

Постановки задач вариационного исчисления. Общая форма первой вариации. Основная лемма вариационного исчисления. Уравнения Эйлера-Лагранжа. Уравнение Остроградского. Задачи с подвижным правым (левым) концом. Условия трансверсальности. Условия Эрдмана-Вейерштрасса. Односторонние вариации. Поле экстремалей. Сопряженная точка. Условие и уравнение Якоби. Функция Вейерштрасса. Сильный и слабый экстремумы. Необходимые и достаточные условия оптимальности для простейшей задачи вариационного исчисления. Условие Лежандра. Вариационные задачи на условный экстремум. Голономные и неголономные связи. Изопараметрические задачи.

**3. Принцип максимума Понтрягина для задач оптимизации управления динамическими системами.**

Математическая формулировка задач оптимального управления динамической системой. Задачи Лагранжа, Майера, Больца. Классический подход к определению оптимальных программ. Гамильтониан. Необходимые условия оптимальности в этом подходе. Игольчатые вариации управления. Принцип максимума Понтрягина для решения задач со свободным правым концом и фиксированным временем. Вариации траектории и конус концевых вариаций фазового вектора. Необходимые условия оптимальности в принципе максимума. Принцип максимума Понтрягина в задачах с фиксированным и нефиксированным временем и подвижным правым концом. Условия трансверсальности. Непрерывность гамильтониана. Условие Лежандра – Клебша. Принцип максимума Понтрягина для задач Лагранжа, Майера, Больца с различными типами условий на управление и траекторию. Дискретный принцип максимума. Энергетический подход и метод сингулярных возмущений для оптимального планирования траекторий самолётов при решении транспортных задач.

**4. Методы решения двухточечных краевых задач.**

Метод Ньютона, методы прогонки, Абрамова, Крылова-Черноуьско. Метод прогонки для линейно-квадратичной задачи оптимального управления. Уравнение Риккати.

**Литература**

1. Моисеев Н.Н., Иванилов Ю.П., Столярова Е.М. Методы оптимизации. Изд. Наука, 1981.
2. Кюнц Г.П., Крелле В. Нелинейное программирование. Изд. Советское радио, 1965.
3. Эльсгольц Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. Изд-во УРСС научной и учебной литературы, 2002.
4. Алексеев В. М., Тихомиров В. М., Фомин С. В. Оптимальное управление. Изд. Наука, 1979.
5. Брайсон А., Ю - ши Хо. Прикладная теория оптимального управления. Изд. Мир, 1972.
6. Моисеев Н.Н. Численные методы в теории оптимальных систем. Изд. Наука, 1971.
7. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. Изд. Физматгиз, 1961.
8. Блисс Г.А. Лекции по вариационному исчислению. Изд. ИЛ, 1950.

