

**АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО**  
**«Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина»**  
**(АО «НПО Лавочкина»)**

Рекомендована к утверждению  
Решением Научно-технического совета  
*Протокол № 02-22 от «25» марта 2022 г.*

**ПРОГРАММА ВСТУПИТЕЛЬНОГО ИСПЫТАНИЯ**  
**ПО СПЕЦИАЛЬНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ**

научной специальности

**2.5.14. Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов**

образовательная программа высшего образования –  
программа подготовки научных и научно-педагогических кадров в  
аспирантуре

**Химки, 2022**

Программа вступительного испытания сформирована на основе федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования.

**Форма проведения испытания:**

Вступительное испытание по специальной дисциплине для поступления на обучение по программе подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре проводится в виде собеседования с обязательным оформлением ответов на вопросы билета в письменном виде. Собеседование проводится с целью выявления у абитуриента объема научных знаний, научно-исследовательских компетенций, навыков системного и критического мышления, необходимых для обучения в аспирантуре. Абитуриент должен показать профессиональное владение теорией и практикой в предметной области, продемонстрировать умение вести научную дискуссию.

**Структура испытания:**

Испытание состоит из ответов на вопросы билета и дополнительные вопросы в рамках программы вступительного испытания.

**Критерии оценки результатов испытания:**

Оценка «отлично» ставится при следующем условии:

даны исчерпывающие и обоснованные ответы на вопросы, поставленные экзаменационной комиссией.

Оценка «хорошо» ставится при следующих условиях:

1) даны полные, достаточно глубокие и обоснованные ответы на вопросы, поставленные экзаменационной комиссией;

2) ответы на вопросы даются полно, но логическая последовательность не всегда соблюдается.

Оценка «удовлетворительно» ставится при следующих условиях:

1) даны в основном правильные ответы на вопросы, поставленные экзаменационной комиссией;

2) ответы на вопросы даются в основном полно, но при слабом логическом оформлении высказываний.

Оценка «неудовлетворительно» ставится в случае, когда не выполнены условия, позволяющие поставить оценку «удовлетворительно».

Решения экзаменационной комиссии принимаются большинством голосов.

## **1. Теория упругости**

Упругое деформирование твердых тел. Основные гипотезы теории упругости. Теория деформаций. Соотношения Коши. Уравнения совместности деформаций.

Теория напряжений. Дифференциальные уравнения равновесия. Статические граничные условия.

Обобщенный закон. Гука. Свойства упругих постоянных. Потенциальная и дополнительная потенциальная энергия. Формулы Грина, Кастильяно и Клапейрона. Обобщенный закон Гука для изотропного, ортотропного и трансверсально-изотропного материалов.

Температурные задачи теории упругости. Уравнения термоупругости. Вариационные принципы и методы теории упругости. Принцип Лагранжа и принцип Кастильяно. Методы Ритца – Тимошенко, Бубнова – Галеркина и Канторовича – Власова.

## **2. Строительная механика**

Механика стержневых упругих систем. Основные понятия и определения. Необходимый признак геометрической неизменяемости. Степень статической неопределимости. Статически определимые стержневые системы: определение внутренних сил в стержнях ферм, об определении внутренних сил в элементах рамнобалочных системах, дополнительная потенциальная энергия термоупругой стержневой системы, определение перемещений. Статически неопределимые стержневые системы: метод сил, определение перемещений, сущность метода перемещений.

Балочная теория цилиндрических оболочек. Исходные положения. Основные гипотезы Интегральные внутренние силы и их связь с обобщенными перемещениями. Статические соотношения для интегральных внутренних сил. Определение нормальных напряжений. Определение потоков касательных сил: открытая оболочка, однозамкнутая оболочка, многозамкнутая оболочка. Центр изгиба.

Цилиндрические стрингерные оболочки открытого профиля. Основные допущения. Уравнения равновесия в обобщенных силах и смещениях. Уравнения равновесия в главных координатах. Главная секториальная площадь и главный бимомент инерции. Определение нормальных напряжений и потоков касательных сил. Определение бимомента. Определение положения центра изгиба.

## **3. Теория колебаний**

Система с одной степенью свободы. Свободные колебания. Вынужденные гармонические колебания. Резонанс. Реакция на действие произвольной возмущающей силы.

Система с конечным числом степеней свободы. Уравнения малых колебаний в обобщенных координатах. Собственные колебания. Условия ортогональности собственных форм. Уравнения в нормальных координатах. Учет демпфирования.

Система с распределенными параметрами. Составление уравнений колебаний. Приведение к системе с конечным числом степеней свободы. Методы сосредоточенных масс, Ритца, конечных элементов.

Поперечные колебания балки. Условия ортогональности собственных форм. Уравнения в нормальных координатах. Учет демпфирования. Применение методов Бубнова-Галеркина и метода Ритца. Учет сдвига и инерции вращения. Применение метода конечных элементов.

Колебания пластин и оболочек. Применение методов Ритца, Бубнова-Галеркина и конечных элементов.

#### **4. Теория пластин и оболочек**

Основы теории изгиба пластин при действии поперечных нагрузок. Гипотезы Кирхгофа Дифференциальное уравнение изгиба пластины в прямоугольной системе координат. Постановка краевых задач Термоупругие уравнения изгиба пластин.

Методы расчета прямоугольных в плане пластин: двойных, одинарных тригонометрических рядов, интеграла Фурье. Осесимметричная задача для круглой пластины.

Безмоментная теория оболочек. Осесимметричная задача для безмоментной оболочки вращения: дифференциальные уравнения равновесия, геометрические и физические соотношения. Уравнения Лапласа и зоны для определения напряжений. Определение напряженного состояния сферических, цилиндрических, тороидальных и конических оболочек при постоянном и гидростатическом давлении.

Общая моментная теория круговых цилиндрических оболочек. Исходные уравнения: дифференциальные уравнения равновесия, геометрические и физические соотношения. Пути решения исходных уравнений: приведение к системе восьми дифференциальных уравнений в частных производных первого порядка или к трем дифференциальным уравнениям относительно перемещений. Разрешающее дифференциальное уравнение в частных производных восьмого порядка при действии нормальной, продольной и окружной внешних нагрузок.

#### **5. Теория пластичности и ползучести**

Пластическое деформирование твердых тел. Предел текучести. Упрочнение. Остаточные деформации. Идеальная пластичность. Физические механизмы пластического течения. Понятие о дислокациях. Локализация пластических деформаций.

Идеальное упругопластическое тело. Идеальное жесткопластическое тело. Пространство напряжений. Критерий текучести и поверхность текучести. Критерии Треска и Мизеса. Пространство главных напряжений. Геометрическая интерпретация условий текучести. Условие полной пластичности. Влияние среднего напряжения. Основные теории ползучести (старения, течения, упрочнения). Ползучесть при сложном напряженном состоянии. Циклическая ползучесть. Линейная и нелинейная вязкоупругость.

## **6. Механика разрушения**

Физические и микромеханические особенности процессов накопления повреждений и разрушения. Феноменологический и микромеханический подходы механики накопления рассеянных повреждений. Законы суммирования повреждений. Применение механики накопления рассеянных повреждений к расчетам на длительную прочность. Применение механики накопления рассеянных повреждений к определению ресурса деформативности. Применение механики накопления рассеянных повреждений к расчету на малоцикловую усталость.

Критерий квазихрупкого разрушения в теории трещин. Коэффициенты интенсивности напряжений. Трещиностойкость конструкционных материалов. Расчет на прочность элементов конструкций с трещиноподобными дефектами. Методы расчета долговечности, основанные на анализе развития трещин.

## **7. Численные методы расчетов динамики и прочности**

Решение систем линейных уравнений. Системы линейных алгебраических уравнений в задачах механики. Метод Гаусса. Выбор ведущего элемента и точность решения. Разложение матриц на треугольные множители. Представление об итерационных методах.

Задачи механики и алгебраическая проблема собственных значений. Степенной метод. Использование сдвига для улучшения сходимости. Метод Якоби.

Численное решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Задача Коши. Метод Эйлера. Методы Рунге-Кутты. Представление о многошаговых методах.

Метод конечных разностей (МКР). Основные положения метода. Формулы конечно-разностных аппроксимаций производных. Применение МКР для решения одномерных краевых задач. Обобщение МКР на многомерный случай. Обсуждение достоинств и недостатков метода.

Конечные элементы сплошной среды (плоские элементы). Плоский треугольный элемент. Плоский прямоугольный элемент. Четырехугольный изопараметрический элемент. Плоские изопараметрические элементы высших порядков.

Конечные элементы сплошной среды (оболочечные и трехмерные). Трехмерные конечные элементы. Тонкостенные конечные элементы.

## **8. Прочность конструкций летательных аппаратов**

Общие сведения о прочности конструкций летательных аппаратов, их типах и конструктивно-силовых схемах, о применяемых конструкционных материалах.

Внешние силы, действующие на летательные аппараты в процессе их эксплуатации. Нагружение конструкций летательных аппаратов в процессе эксплуатации. Внутренние силовые факторы в конструкции и методы их определения. Температурные режимы элементов конструкций летательных аппаратов.

Нормирование нагружения и прочности конструкций летательных аппаратов. Расчет нагружения летательных аппаратов на различных этапах эксплуатации. Прочностные расчеты корпусов летательных аппаратов различных типов. Прочностные расчеты крыльев и органов аэродинамической стабилизации самолетов. Прочностной расчет конструкций шасси самолета.

Экспериментальная проверка прочности конструкции летательных аппаратов.

## 9. Динамика упругих систем

Составление уравнений колебаний конструкций ЛА. Расчетные математические модели. Приведение к системе с конечным числом степеней свободы. Методы Ритца, МКЭ, сосредоточенных масс. Приведение системы к нормальным координатам.

Колебания осесимметричных тонкостенных конструкций типа корпуса ЛА.

Продольные колебания корпуса. Приведение к эквивалентному стержню. Применение метода отсеков. Отсеки в виде безмоментной и моментной оболочек вращения. Поперечные колебания корпуса. Влияние сдвига и инерции вращения. Отсеки в виде оболочек вращения при изгибе-сдвиге. Уравнения колебаний корпуса как системы отсеков оболочек. Условия сопряжения отсека со шпангоутом.

Изгибно-крутильные колебания тонкостенных конструкций типа крыла и фюзеляжа.

Расчетные модели. Метод Ритца. Метод отсеков с учетом депланаций и искривлений контура поперечных сечений. Колебания крыла малого удлинения как составной тонкостенной конструкции.

Колебания упругих баков жидкостью. Формулировка задачи. Вариационные принципы. Собственные колебания. Уравнения в обобщенных координатах. Баки в форме оболочек вращения. Вариационных методы расчета колебаний жидкости в баках. Поперечные колебания жидкости в подвижной недеформируемой полости вращения. Учет сжимаемости жидкости.

## 10. Механика композитов

Структура полимерных волокнистых композитов. Свойства полимерных композитных материалов. Физическая модель однонаправленного материала. Физическая модель многослойного

композита. Многослойный композит с общей анизотропией свойств, ортотропный композит. Нитяная модель материала.

Особенности и виды разрушения волокнистых композитов. Критерии прочности композиционных материалов.

Литература:

- 1) Анизотропные панели – плоская задача / А.А. Дудченко, А.Н. Елпатьевский, С.А. Лурье, В.В. Фирсанов - М.: Изд-во МАИ, 1991. 96 с.
- 2) Авдонин А.С., Фигуровский В.И. Расчет на прочность летательных аппаратов. Учебник для вузов. -М.: Машиностроение. 1985.440 с.
- 3) Волчков О.Д. Прочность ракет-носителей Часть I. - М.: Изд-во МАИ, 2007, 752 с.
- 4) Волчков О.Д. Прочность ракет-носителей Часть 2. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010. 680 с.
- 5) Демидов С.П. Теория упругости. М.: Высшая школа. 1979, 432 с.
- 6) Дудченко А.А. Основы теории пластичности. М.: Изд-во МАИ. 1978. 72 с.
- 7) Дудченко А.А. Основы теории ползучести. М.: Изд-во МАИ, 1985. 36 с.
- 8) Мовчан А.А. Механика накопления рассеянных повреждений в элементах конструкций. -М.: МАИ, 1996. 64 с.
- 9) Морозов В.С. Численные методы решения прикладных задач строительной механики. - М.: МАИ, 1993. - 56с.
- 10) Образцов И.Ф. и др. Строительная механика летательных аппаратов. - М.: Машиностроение, 1986. 536 с.
- 11) Образцов И.Ф., Савельев Л.М., Хазанов Х.С. Метод конечных элементов в задачах строительной механики летательных аппаратов. - М.: Высшая школа, 1985. - 392с.
- 12) Победря Б.Е. Численные методы упругости и пластичности: М.: Изд-во МГУ, 1995. 366 с.
- 13) Рыбаков Л.С. Практикум по строительной механике ЛА. Плоская задача теории упругости. М.: Изд-во МАИ. 1991, 550 с.
- 14) Рыбаков Л.С. Введение в механику разрушения. - М.: МАИ, 1980. 81 с.
- 15) Тютюнников Н.П. Численные методы строительной механики. - М.: Изд-во МАИ, 2000.104 с.
- 16) Гришанина Т.В., Шклярчук Ф.Н. Колебания упругих систем. М.: Изд-во МАИ, 2013.100 с.
- 17) Шклярчук Ф.Н. Динамика конструкций летательных аппаратов. - М.: Изд-во МАИ, 1983 г. 80 с.

## **11. Характеристика околоземного космического пространства**

Особенности внешних источников теплоты и основные задачи расчета. Физические характеристики околоземного космического пространства:

давление и состав газа, электромагнитное излучение Солнца, корпускулярные потоки, микрометеорные потоки, собственное излучение Земли, отраженное от Земли солнечное излучение.

Математические модели внешнего теплообмена космического аппарата (КА). Модели излучения Солнца и планет для расчета внешнего теплового воздействия на КА. Расчет солнечного миделя поверхности КА. Расчет угловых коэффициентов для элементов поверхности КА.

Литература:

- 1) Малоземов В.В., Рожнов В.Ф., Правецкий В.Н. Системы жизнеобеспечения экипажей летательных аппаратов. Учебник. М.: Машиностроение, 1986.
- 2) Малоземов В.В. Тепловой режим космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1980.
- 3) Залетаев В.М., Капинос Ю.В., Сургучев О.Н. Расчет теплообмена космического аппарата. М.: Машиностроение, 1979.
- 4) Моделирование тепловых режимов космического аппарата и окружающей его среды / Под ред. Г.И. Петрова. М.: Машиностроение, 1971.

## 12. Подсистемы теплозащиты

Теплоограждающие подсистемы теплозащиты. Подсистемы на основе терморегулирующих покрытий. Подсистемы на основе экранно-вакуумной тепловой изоляции. Подсистемы на основе однородной теплоизоляции.

Теплорассеивающие подсистемы теплозащиты с конвективным охлаждением. Подсистемы с воздухонепроницаемой теплоизоляцией. Подсистемы с пористой теплоизоляцией. Нестационарный теплообмен в теплорассеивающей подсистеме теплозащиты с пористой теплоизоляцией.

Математическое моделирование и идентификация математических моделей процессов теплообмена. Математические модели подсистем теплозащиты ЛА. Методы и алгоритмы идентификации математических моделей сложного теплообмена. Оптимальное планирование тепловых экспериментов. Теплофизический эксперимент.

Рекомендуемая литература:

- 1) Алифанов О.М. Идентификация процессов теплообмена летательных аппаратов (введение в теорию обратных задач теплообмена). М.: Машиностроение, 1979.
- 2) Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Ненарокомов А.В. Идентификация математических моделей сложного теплообмена. М.: Изд-во МАИ, 1999.
- 3) Алифанов О.М., Вабищевич П.Н., Михайлов В.В., др. Основы идентификации и проектирования тепловых процессов и систем. М.: Логос, 2001.

- 4) Малоземов В.В., Рожнов В.Ф., Правецкий В.Н. Системы жизнеобеспечения экипажей летательных аппаратов. Учебник. М.: Машиностроение, 1986.
- 5) Малоземов В.В. Тепловой режим космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1980.
- 6) Рожнов В.Ф. Основы теории инженерного эксперимента. М.: Изд-во МАИ, 2011.

### 13. Системы обеспечения теплового режима КА

Внутренние источники теплоты. Тепловой режим экипажа. Математические модели теплового режима экипажа. Выделение теплоты оборудованием.

Подсистемы терморегулирования. Конвективные подсистемы терморегулирования. Разомкнутые подсистемы с изменением агрегатного состояния хладагента. Замкнутые подсистемы с изменением агрегатного состояния хладагента. Анализ совместной работы замкнутой подсистемы терморегулирования и энергетической установки.

Подсистема поддержания влажности. Основные параметры влажного воздуха. Способы поддержания влажности. Математическая модель подсистемы поддержания влажности.

Подсистемы обеспечения вентиляции. Приточные вентиляционные струи. Способы подачи и удаления воздуха. Схемы вентиляции термоотсеков.

Рекомендуемая литература:

- 1) Малоземов В.В., Рожнов В.Ф., Правецкий В.Н. Системы жизнеобеспечения экипажей летательных аппаратов. Учебник. М.: Машиностроение, 1986.
- 2) Малоземов В.В. Тепловой режим космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1980.
- 3) Залетаев В.М., Капинос Ю.В., Сургучев О.Н. Расчет теплообмена космического аппарата. М.: Машиностроение, 1979.
- 4) Малоземов В.В., Кудрявцева Н.С. Системы терморегулирования космических аппаратов М.: Машиностроение, 1995.
- 5) Малоземов В.В., Кудрявцева Н.С. Проектирование систем обеспечения теплового режима КА: Учебное пособие. М.: МАИ, 1995.
- 6) Малоземов В.В., Кудрявцева Н.С. Оптимизация систем терморегулирования космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1988.
- 7) Кудрявцева Н.С. Основы проектирования эффективных систем терморегулирования космических аппаратов, М.: Изд-во МАИ, 2012.

## 14. Проектирование систем терморегулирования КА

Методология проектирования систем терморегулирования (СТР) КА. Общая постановка задачи проектирования СТР. Особенности математического моделирования СТР. Идентификация в математическом моделировании и проектировании. Оптимизация в задаче проектирования.

Математическое моделирование агрегатов, элементов и СТР. Теплообменники. Радиаторы - излучатели. Трубопроводы. Гермокабина. Радиоэлектронное оборудование. Регуляторы. Математическое моделирование СТР на ЦВМ.

Оптимизация проектных параметров СТР. Критерии оптимизации. Методы оптимизации. Математическое моделирование агрегатов и СТР в задачах оптимального проектирования.

Автоматическое регулирование параметров СТР. Нелинейные автоматические системы терморегулирования. Определение параметров автоколебаний в системе терморегулирования методом припасовывания. Показатели качества процесса регулирования теплового режима. Пульсирующие режимы в СТР и способы их устранения. Оценка оптимальных параметров автоматической системы терморегулирования.

Литература:

- 1) Алифанов О.М. Идентификация процессов теплообмена летательных аппаратов (введение в теорию обратных задач теплообмена). М.: Машиностроение, 1979.
- 2) Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Ненарокомов А.В. Идентификация математических моделей сложного теплообмена. М.: Изд-во МАИ, 1999.
- 3) Алифанов О.М., Вабищевич П. Н, Михайлов В.В., др. Основы идентификации и проектирования тепловых процессов и систем. М.: Логос, 2001.
- 4) Малоземов В.В., Рожнов В.Ф., Правецкий В.Н. Системы жизнеобеспечения экипажей летательных аппаратов. Учебник. М.: Машиностроение, 1986.
- 5) Малоземов В.В. Тепловой режим космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1980.
- 6) Залетаев В.М., Капинос Ю.В., Сургучев О.Н. Расчет теплообмена космического аппарата. М.: Машиностроение, 1979.
- 7) Малоземов В.В., Кудрявцева Н.С. Системы терморегулирования космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1995.
- 8) Малоземов В.В., Кудрявцева Н.С. Проектирование систем обеспечения теплового режима КА: Учебное пособие. М : МАИ, 1995.
- 9) Малоземов В.В., Кудрявцева Н.С. Оптимизация систем терморегулирования космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1988.
- 10) Кудрявцева Н.С. Основы проектирования эффективных систем терморегулирования космических аппаратов, М.: Изд-во МАИ, 2012.