

Государственная корпорация по космической деятельности  
"РОСКОСМОС"

Федеральное государственное унитарное предприятие  
«Центральный научно-исследовательский институт  
машиностроения»  
(ФГУП ЦНИИмаш)

**УТВЕРЖДАЮ**  
Генеральный директор  
ФГУП ЦНИИмаш,  
кандидат технических наук,  
С.В. Коблов  
2019 г.

**ПРОГРАММА ВСТУПИТЕЛЬНОГО ИСПЫТАНИЯ В  
АСПИРАНТУРУ  
НАПРАВЛЕНИЕ ПОДГОТОВКИ**

**24.06.01 Авиационная и ракетно-космическая техника**

**Направленность/профиль 05.07.03**

**Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов**

Королев, 2019

## **1. Вводные положения**

Задачи обеспечения прочности летательных аппаратов. Механика деформируемого твердого тела (МДТТ) – научная основа расчетов на прочность. Основные понятия МДТТ.

## **2. Деформации**

Кинематика деформируемой среды. Эйлеровы и Лагранжевы координаты. Перемещения. Различные меры деформации (Коши, Альманзи, логарифмическая мера). Тензор деформаций. Малые и конечные деформации. Способы измерения деформаций. Интенсивность деформаций.

## **3. Напряжения**

Внутренние силы в деформируемом материале. Определение напряжений. Соотношение Коши. Различные способы введения тензора напряжений.

## **4. Связь между деформациями и напряжениями.**

Инварианты напряжений и деформаций. Главные деформации и напряжения, их физический смысл. Упругий потенциал. Обобщенный закон Гука однородного изотропного материала. Упругие постоянные материала. Способы определения упругих постоянных. Закон упругости анизотропного материала. Виды упругой симметрии. Ортотропный материал. Упругопластические деформации. Условия пластичности. Интенсивность напряжений Теория малых упругопластических деформаций. Теория пластического течения. Ползучесть и релаксация. Основные понятия теории вязкоупругости.

## **5. Уравнения равновесия и движения**

Уравнения равновесия и движения в напряжениях. Симметрия тензора напряжений Коши. Граничные условия. Постановка основных задач теории упругости. Термоупругость. Условия сплошности Сен-Венана. Уравнения движения в перемещениях. Векторная форма уравнений в перемещениях. Волны сжатия и сдвига.

## **6. Базовые задачи теории упругости.**

Задача Буссинеска о действии сосредоточенной силы на полупространства. Контактная задача Герца. Задача Ляме для цилиндра и шара. Плоская задача и задача Сен-Венана как основа теории стержней, пластин и оболочек.

## **7. Основы теории тонкостенных конструкций.**

Тонкостенные конструкции – основа силовой схемы летательных аппаратов. Виды тонкостенных конструкций. Принципы редукции общих уравнений теории упругости к моделям стержней, пластин и оболочек. Гипотезы Бернулли, Кирхгоффа, Лява.

## **8. Статика и динамика стержней.**

Балочные модели ракетных конструкций. Уравнения движения стержневых конструкций. Динамические и кинематические граничные условия. Вариационные

принципы. Продольные и поперечные колебания балок. Собственные частоты и формы колебаний. Методы Ритца, Галеркина. Устойчивость сжатых стержней. Концепция упругой устойчивости Эйлера. Динамическая концепция устойчивости. Области применимости. Неконсервативные задачи теории упругой устойчивости. Численные методы решения задач статики, динамики и устойчивости стержней.

## **9. Статика и динамика пластин.**

Уравнения равновесия и движения пластин. Линейная теория, уравнение Сен-Жермен – Лагранжа. Базовые решения теории пластин (круглая и прямоугольная пластины при поперечной нагрузке). Колебания пластин. Приближенные методы определения частот и форм колебаний. Пределы применимости линейной теории. Нелинейная теория. Уравнения Феппля-Кармана. Функция напряжений. Устойчивость пластин. Численные методы расчета статики и динамики пластин.

## **10. Основы теории оболочек.**

Основные соотношения дифференциальной геометрии. Криволинейные координаты на поверхности. Кривизна поверхности. Первая и вторая квадратичные формы. Гипотезы Кирхгоффа-Лява. Деформации оболочки. Нелинейные деформации и пути упрощения. Соотношения Новожилова. Напряжения в оболочке. Усилия и моменты. Энергия деформации оболочки. Уравнения движения в усилиях и моментах. Пологие оболочки. Функция усилий и связь с плоской задачей теории упругости. Нелинейные уравнения в форме Кармана. Уравнения в перемещениях.

## **11. Основные задачи теории тонкостенных оболочек.**

Классификация напряженных состояний оболочек. Безмоментное состояние, изгибное состояние и краевой эффект. Базовые решения по безмоментной теории. Расчет баллонов. Расчет изгибных напряжений в краевой зоне. Колебания оболочек. Особенности спектра собственных частот. Колебания с преобладанием деформаций изгиба и растяжения. Базовые задачи: колебания цилиндрической и сферической оболочки. Методы Ритца и Галеркина применительно к расчету колебаний. Условия применимости линейной теории. Устойчивость оболочек. Классические решения задачи устойчивости. Понятие о верхней критической нагрузке. Причины расхождения теоретических и экспериментальных результатов. Понятие о закритическом состоянии. Концепция нижней критической нагрузки. Оболочки при упругопластических деформациях. Базовые решения о воздействии статических, динамических и импульсных нагрузок (безмоментные напряженные состояния) на цилиндрические и сферические оболочки.

## **12. Основы численных методов в теории тонкостенных конструкций.**

Численные методы расчета нагрузок на летательные аппараты. Метод конечных элементов. Метод конечных разностей. Метод конечных элементов (МКЭ) как метод численной реализации методов Галеркина, Ритца. Метод Ньютона, модифицированный метод Ньютона-Рафсона. Устойчивость и сходимость решений. Методы исследования устойчивости. Исходные данные для формирования конечноэлементной модели. Процесс и типы динамического анализа. Матрицы масс и жесткости. Программный комплекс MSC.NASTRAN. Численные методы модального анализа. Методы Ланцоша, Гивенса и Хаусхолдера. Метод итераций подпространства. Методы редуцирования конечноэлементных моделей. Редуцирование модели КА, анализ репрезентативности модели. Анализ результатов, полученных средствами NASTRAN и иных программных

комплексов. Численное моделирование конечных деформаций и нелинейные модели материалов: нелинейная упругость, упругопластичность, вязкоупругость (ползучесть, релаксация). Численное моделирование разрушения при контактном взаимодействии. Методом сглаженных частиц (SPH) с использованием ANSYS LS-DYNA и ANSYS AUTODYN. Понятие о функции сглаживания, её настройки. Критерии разрушения для SPH постановки при высокоскоростном взаимодействии. Пост-процессорная обработка результатов решения задач в ANSYS LS-DYNA и ANSYS AUTODYN.

## Литература

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. 3-е изд. М.: Наука, 1965.
2. Зубчанинов В.Г. Основы теории упругости и пластичности. М.: Высшая школа. 1990.
3. Вольмир А.С.. Устойчивость деформируемых систем. ч. 1,2. М. Юрайт. 2018.
4. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твёрдого тела. М., Физматлит, 1988.
5. Фельдштейн В.А. Основы механики и динамической прочности тонкостенных конструкций. Ч. I. Основные соотношения механики деформируемого твердого тела и теории тонкостенных конструкций. МФТИ, ЦНИИмаш. Королев. 2016.
6. Фельдштейн В.А. Основы механики и динамической прочности тонкостенных конструкций. Ч. II. Прочность и устойчивость тонкостенных конструкций при динамическом, импульсном и ударном нагружении. МФТИ, ЦНИИмаш. Королев. 2016.
7. В.А. Еремеев, Л.М. Зубов. Механика упругих оболочек. М. Наука. 2008.
8. Адамов А.А., Матвеев В.П., Труфанов П.А., Шердаков И.П. Методы прикладной вязкоупругости. Екатеринбург: УрО РАН. 2003.
9. Годунов С.К., Рябенький В.С. Разностные схемы: введение в теорию. М., Наука, 1977г.
4. ABAQUS theory manual, version 6.11: Dassault Systemes, 2011.
5. ABAQUS user's manual, version 6.11: Dassault Systemes, 2011.
7. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. The finite element method. The basis. Vol. 1. 2000, 708s.
8. Liu G. R., Quek S. S. The Finite Element Method: A Practical Course. 2003, 346s.
9. Грачёв В. Ю. Экспертиза и экспертная оценка компьютерных расчётов. 000«СИТИС», 2010 г.
10. Dynamics User's guide. MD NASTRAN, MSC.Software Corp.,2010.
11. Reference Manual. MD NASTRAN, MSC.Software Corp.,2010.
12. Numerical Methods User's guide. MD NASTRAN, MSC.Software Corp.,2010.

## Критерии оценивания ответа на вступительном экзамене по специальности

«отлично» - знания глубокие, всесторонние. Ответ полный, без замечаний, продемонстрированы знания по специальной дисциплине. Логичное, последовательное изложение материала. Свободное владение и корректное использование терминов и понятий. Содержательность, смысловая и структурная завершенность высказываний. Соблюдение литературного языка, преобладание научного стиля изложения.

«хорошо» - знание материала в пределах программы. Ответ полный, с незначительными замечаниями. В целом логически корректное, но не всегда точное и аргументированное изложение ответа. Неточности в определении понятий, использование профессиональной терминологии не в полном объеме. Соблюдение норм литературного языка.

«удовлетворительно» - фрагментарные, поверхностные знания материала. Ответ не полный, с существенными замечаниями. Нарушение логики изложения. Плохое владение понятиями, редкое использование профессиональной терминологии. Слабое знакомство с рекомендованной литературой.

«неудовлетворительно» - незнание либо отрывочные представления материала. Ответ на поставленный вопрос не дан. Беспорядочное и неуверенное изложение материала. Затруднения в определении основных понятий, некорректное использование профессиональной терминологии. Неумение логически определенно и последовательно изложить ответ.