

ПРОГРАММА-МИНИМУМ

кандидатского экзамена по специальности

05.07.03 [Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов]

по техническим наукам

Введение

В основу настоящей программы положены следующие дисциплины: сопротивление материалов, теория упругости, пластичности и ползучести; строительная механика летательных аппаратов; теория колебаний; термодинамика, теория теплопроводности и теплопередачи; численные методы и математическое моделирование.

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 и ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского.

1. Динамика конструкций и прочность летательных аппаратов (ЛА). Расчет тонкостенных элементов конструкции

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 линейноупругого 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 ЛА. 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 колеблющуюся 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 и 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 редуционных 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 объемном тепловыделении 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, сходимость 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 в канале. 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 тепло- и массообмена. 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.

3. Теплообмен в пограничном слое

3.1. Математическое моделирование теплообмена в пограничном слое. Уравнения пограничного слоя. Сведение уравнений пограничного слоя к обыкновенным дифференциальным уравнениям. Методы решения уравнений. Частные случаи: обтекание пластины, критическая точка.

Физико-химические процессы в газах. Основные понятия и определения химической кинетики. Равновесные и неравновесные состояния. Реакции в газе на поверхности (каталитическая активность материалов).

3.2. Критериальные соотношения и частные случаи. Критериальные соотношения конвективного теплообмена при ламинарном и турбулентном режимах течения. Поправочные множители. Теплообмен на лобовой поверхности затупленного тела. Учет влияния неравновесных процессов в пограничном слое и на поверхности тела.

Теплообмен на проницаемой поверхности. Особенности пограничных слоев при вдуве инородного газа и отсосе газа. Влияние вдува на интенсивность теплообмена в зоне вдува и на расстоянии от нее.

Теплообмен в двухфазном потоке.

Обтекание затупленных тел излучающим газом. Модели излучающего газа. Влияние излучения на термодинамические параметры газа. Радиационные тепловые потоки при обтекании затупленных тел. Опережающее излучение. Влияние вдува на интенсивность излучения поверхности тела.

Теплообмен в свободномолекулярном потоке газа.

4. Системы обеспечения тепловых режимов космических аппаратов (КА)

4.1. Характеристика околоземного космического пространства. Физические характеристики околоземного космического пространства: давление и состав газа, электромагнитное излучение Солнца, корпускулярные потоки, микрометеоритные потоки, собственное излучение

Земли, отраженное от Земли солнечное излучение. Влияние этих факторов на радиационные характеристики покрытий.

4.2. Математические модели и методы расчета. Модели излучения Солнца и планет для расчета внешнего теплового воздействия на КА.

Расчет относительно величины солнечного миделя поверхности КА.

Расчет локального и комбинированного углового коэффициента для элемента поверхности КА. Оценка облученности КА при зеркальном отражении солнечного излучения от планеты.

4.3. Классификация систем обеспечения теплового режима КА и их особенности. Основные элементы систем обеспечения теплового режима, их общая характеристика терморегулирующие покрытия, экранно-вакуумная теплоизоляция, тепловые аккумуляторы, испарители, теплообменники (в том числе и радиационные), тепловые трубы, вентиляторы, насосы.

Методы оценки холодо- и теплопроизводительности радиационных теплообменников, эффективность облучения. Использование термодинамических циклов в системах терморегулирования. Термоэлектрическое охлаждение.

Основная литература

Авдонин А.С., Фигуровский В.И. Расчет на прочность летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1985.

Балабух Л.И., Алфутов Н.А., Усюкин В.И. Строительная механика ракет. М.: Высш. школа, 1984.

Безухов Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести. М.: Высш. школа, 1968.

Аэрогидроупругость конструкций / А.Г. Горшков, В.И. Морозов, А.Т. Пономарев, Ф.Н. Шклярчук. М.: Физматлит, 2000.

Колесников К.С. Динамика ракет. М.: Машиностроение, 1980.

Строительная механика летательных аппаратов / И.Ф. Образцов, Л.А. Булычев, В.В. Васильев и др. М.: Машиностроение, 1986.

Образцов И.Ф., Савельев Л.М., Хазанов Х.С. Метод конечных элементов в задачах строительной механики летательных аппаратов. М.: Высш. школа, 1985.

Усюкин В.И. Строительная механика конструкций космической техники. М.: Машиностроение, 1988.

Авдуевский В.С. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике. М.: Машиностроение, 1975.

Агафонов В.П., Вертушкин В.К. Неравновесные физико-химические процессы в аэродинамике. М.: Машиностроение, 1972.

Алифанов О.М. Идентификация процессов теплообмена летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1979.

Белов С.В. Пористые металлы в машиностроении. М.: Машиностроение, 1981.

Беляев Н.М. Методы теории теплопроводности. М.: Высш. школа, 1982.

Залетаев В.М., Капинос Ю.В. Расчет теплообмена космического аппарата. М.: Машиностроение, 1979.

Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высш. школа, 1967.

Моделирование тепловых режимов космического аппарата и окружающей его среды / Под ред. Г.И. Петрова. М.: Машиностроение, 1971.

Фаврский О.Н., Каданер Я.С. Вопросы теплообмена в космосе. М.: Высш. школа, 1972.