

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования



**Пермский национальный исследовательский
политехнический университет**

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе


_____ Н.В.Лобов

« 31 » января 20 22 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Дисциплина: Конструкция и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок
(наименование)

Форма обучения: очная
(очная/очно-заочная/заочная)

Уровень высшего образования: специалитет
(бакалавриат/специалитет/магистратура)

Общая трудоёмкость: 360 (10)
(часы (ЗЕ))

Направление подготовки: 24.05.02 Проектирование авиационных и ракетных двигателей
(код и наименование направления)

Направленность: Проектирование авиационных двигателей и энергетических установок (СУОС)
(наименование образовательной программы)

1. Общие положения

1.1. Цели и задачи дисциплины

Целью изучения дисциплины является получение комплекса знаний, умений и навыков студента связанных с решением задач, проектирования, расчета, исследования и производства авиационных двигателей и энергетических установок.

Задачи дисциплины

формирование знаний:

- методик проведения прочностных расчётов основных элементов авиационных двигателей и энергетических установок;
- требований к конструкции и конструкцию основных узлов авиационных двигателей и энергетических установок;
- современных методов проектирования основных узлов и элементов авиационных двигателей и энергетических установок;
- передового опыта использования средств автоматизированного проектирования при разработке авиационных двигателей;
- научной и технической терминологии в области авиационных двигателей и энергетических установок;
- основных правил составления технических описаний основных узлов и элементов авиационных двигателей и энергетических установок.

формирование умений:

- проводить прочностные расчёты основных элементов авиационных двигателей и энергетических установок с использованием аналитических и численных методов;
- обосновывать выбор конструктивных решений деталей и узлов авиационных двигателей, с точки зрения надежности двигателя;
- разрабатывать описания и конструкторскую документацию основных узлов авиационных двигателей и энергетических установок;
- формулировать профессиональным языком проблемы в области авиационных двигателей и энергетических установок;
- составлять технические описания основных узлов и элементов авиационных двигателей и энергетических установок;

формирование навыков:

- проведения прочностных расчётов основных элементов авиационных двигателей и энергетических установок с использованием аналитических и численных методов с применением современных программных средств;
- анализа полученных результатов для принятия технических решений;
- разработки конструкции деталей, элементов и узлов авиационных двигателей и энергетических установок;
- технического описания узлов и элементов авиационных двигателей и энергетических установок.

1.2. Изучаемые объекты дисциплины

- конструкция узлов и деталей газотурбинных двигателей;
- методы оценки нагруженности деталей газотурбинных двигателей;
- методы обеспечения статической прочности и циклического ресурса деталей газотурбинных двигателей;
- методы исследования вибраций и обеспечения динамической прочности деталей и узлов газотурбинных двигателей.

1.3. Входные требования

Не предусмотрены

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине

Компетенция	Индекс индикатора	Планируемые результаты обучения по дисциплине (знать, уметь, владеть)	Индикатор достижения компетенции, с которым соотнесены планируемые результаты обучения	Средства оценки
ПК-2.1	ИД-1ПК-2.1	Знает -методики проведения прочностных расчётов основных элементов авиационных двигателей и энергетических установок	Знает методики и этапность проведения газодинамических, тепловых и прочностных расчётов процессов в авиационных двигателях и энергетических установках.	Экзамен
ПК-2.1	ИД-2ПК-2.1	Умеет - проводить прочностные расчёты основных элементов авиационных двигателей и энергетических установок с использованием аналитических и численных методов	Умеет проводить газодинамические, тепловые и прочностные расчёты авиационных двигателей и энергетических установок и их элементов с использованием аналитических и численных методов исследования.	Защита лабораторной работы
ПК-2.1	ИД-3ПК-2.1	Владеет - навыками проведения прочностных расчётов основных элементов авиационных двигателей и энергетических установок с использованием аналитических и численных методов с применением современных программных средств - навыками анализа полученных результатов для принятия технических решений	Владеет навыками проведения газодинамических, тепловых и прочностных расчётов авиационных двигателей и энергетических установок и их элементов с использованием аналитических и численных методов исследования с применением современных программных средств и анализа полученных результатов для принятия технических решений.	Курсовой проект

Компетенция	Индекс индикатора	Планируемые результаты обучения по дисциплине (знать, уметь, владеть)	Индикатор достижения компетенции, с которым соотнесены планируемые результаты обучения	Средства оценки
ПК-2.2	ИД-1ПК-2.2	Знает - требования к конструкции и конструкцию основных узлов авиационных двигателей и энергетических установок - современные методы проектирования основных узлов и элементов авиационных двигателей и энергетических установок - передовой опыт использования средств автоматизированного проектирования при разработке авиационных двигателей	Знает современные средства автоматизации эскизного, технического и рабочего проектирования (модернизации) авиационных двигателей и энергетических установок, их узлов и деталей.	Дифференцированный зачет
ПК-2.2	ИД-2ПК-2.2	Умеет - обосновывать выбор конструктивных решений деталей и узлов авиационных двигателей, с точки зрения надежности двигателя; - разрабатывать описания и конструкторскую документацию основных узлов авиационных двигателей и энергетических установок	Умеет разрабатывать эскизные, технические и рабочие проекты, конструкторскую документацию на создание (модернизацию) авиационных двигателей и энергетических установок, их узлов и деталей.	Защита лабораторной работы
ПК-2.2	ИД-3ПК-2.2	Владеет - практическими навыками разработки конструкции деталей, элементов и узлов авиационных двигателей и энергетических установок	Владеет навыками разработки проектов и конструкторской документации для создания (модернизации) двигателей летательных аппаратов, их узлов и деталей с использованием передового опыта и средств автоматизированного проектирования.	Курсовой проект
ПК-2.4	ИД-1ПК-2.4	Знает - научную и техническую терминологию в области авиационных двигателей и энергетических	Знает требования к составлению описаний принципов действия и устройства проектируемых изделий и	Экзамен

Компетенция	Индекс индикатора	Планируемые результаты обучения по дисциплине (знать, уметь, владеть)	Индикатор достижения компетенции, с которым соотнесены планируемые результаты обучения	Средства оценки
		установок - основные правила к составлению технических описаний основных узлов и элементов авиационных двигателей и энергетических установок	объектов.	
ПК-2.4	ИД-2ПК-2.4	Умеет – формулировать профессиональным языком проблемы в области авиационных двигателей и энергетических установок - составлять технические описания основных узлов и элементов авиационных двигателей и энергетических установок	Умеет составлять описания принципов действия и устройства проектируемых изделий.	Защита лабораторной работы
ПК-2.4	ИД-3ПК-2.4	Владеет - практическими навыками технического описания узлов и элементов авиационных двигателей и энергетических установок	Владеет навыками составления описания принципов действия и устройства проектируемых изделий и объектов с научно-техническим и технико-экономическим обоснованием принятых проектно-технических решений.	Курсовой проект

3. Объем и виды учебной работы

Вид учебной работы	Всего часов	Распределение по семестрам в часах	
		Номер семестра	
		9	10
1. Проведение учебных занятий (включая проведение текущего контроля успеваемости) в форме:	136	72	64
1.1. Контактная аудиторная работа, из них:			
- лекции (Л)	60	32	28
- лабораторные работы (ЛР)	68	36	32
- практические занятия, семинары и (или) другие виды занятий семинарского типа (ПЗ)			
- контроль самостоятельной работы (КСР)	8	4	4
- контрольная работа			
1.2. Самостоятельная работа студентов (СРС)	188	72	116
2. Промежуточная аттестация			
Экзамен	36		36
Дифференцированный зачет	9	9	
Зачет			
Курсовой проект (КП)	36		36
Курсовая работа (КР)			
Общая трудоемкость дисциплины	360	144	216

4. Содержание дисциплины

Наименование разделов дисциплины с кратким содержанием	Объем аудиторных занятий по видам в часах			Объем внеаудиторных занятий по видам в часах
	Л	ЛР	ПЗ	
9-й семестр				

Наименование разделов дисциплины с кратким содержанием	Объем аудиторных занятий по видам в часах			Объем внеаудиторных занятий по видам в часах
	Л	ЛР	ПЗ	СРС
Конструкция основных узлов ГТД	32	36	0	72
<p>Введение. Роль и место дисциплины в системе подготовки специалиста по авиационным двигателям и энергетическим установкам. Структура дисциплины. Основные термины.</p> <p>Тема 1. Конструкция компрессоров ГТД Основные требования к конструкции компрессоров и проблемы, решаемые при их проектировании. Конструктивные схемы и классификация компрессоров. Роторы осевого компрессора: назначение, требования, условия работы и нагружения. Расположение роторов компрессоров относительно опор. Типы роторов компрессоров. Соединение элементов в роторах, центрирование, передача крутящего момента. Сварные роторы. Роторы одноступенчатых вентиляторов. Рабочие лопатки: условия работы и действующие нагрузки, основные требования, основные элементы лопаток и их функциональное назначение, способы крепления к дискам (барабанам) роторов, конструкция хвостовиков, фиксация лопаток от продольных перемещений, бандажирование лопаток. Лопатки вентиляторов: особенности конструкции, крепление к дискам, способы обеспечения жесткости сплошных и полых лопаток. Материалы, применяемые для основных элементов конструкции роторов: дисков (барабанов), лопаток, валов. Корпусы компрессоров: назначение, условия работы и нагружения, основные требования к ним. Конструкции корпусов и способы их изготовления. Корпусы опор ротора и способы передачи усилий, возникающих на опорах. Особенности конструкции корпусов одноступенчатых вентиляторов. Противообледенительные и противопомпажные устройства в осевых компрессорах. Конструкция направляющих аппаратов, их крепление к корпусу. Нагрузки, действующие на направляющие лопатки. Особенности конструкции входных направляющих аппаратов и спрямляющих аппаратов последних ступеней. Материалы, применяемые для элементов конструкции корпусов и направляющих аппаратов. Перспективные материалы и технологии в изготовлении корпусов. Тема 2. Конструкция турбин ГТД. Основные требования к конструкции турбин и</p>				

Наименование разделов дисциплины с кратким содержанием	Объем аудиторных занятий по видам в часах			Объем внеаудиторных занятий по видам в часах
	Л	ЛР	ПЗ	СРС
<p>проблемы, решаемые при их проектировании.</p> <p>Конструктивные схемы и классификация газовых турбин.</p> <p>Роторы турбин: назначение, требования, условия работы и нагружения, типы роторов, расположение относительно опор. Основные способы соединения дис-ков с валом и дисков с дисками в роторах турбин. Диски рабочих колес, основ-ные элементы, их функциональное назначение, конструктивное исполнение. Ра-бочие лопатки: условия работы и действующие нагрузки, основные требования, основные элементы лопаток и их функциональное назначение, способы крепле-ния к дискам, конструкция хвостовиков, фиксация от продольных перемещений. Бандажирование лопаток, назначение, конструктивное исполнение бандажных полок.</p> <p>Корпуса турбин: назначение, условия работы и нагружения, основные требо-вания к ним.</p> <p>Конструкция корпусов. Соединение основных частей корпусов между собой и с другими элементами конструкции. Корпуса опор роторов и способы передачи усилий, возникающих на опорах. Сопловые аппараты турбин, их крепление к корпусам. Условия работы и нагружения сопловых лопаток, кон-струкция сопловых лопаток первых и последующих ступеней турбины.</p> <p>Тепловое состояние элементов турбин.</p> <p>Температурное поле в поперечном сечении высокотемпературных охлаждаемых лопаток. Поля температур в лопат-ках и дисках на стационарных и нестационарных режимах работы двигателя.</p> <p>Охлаждение элементов турбин. Принципы организации систем охлаждения тур-бин. Требования к охлаждающему воздуху. Расход воздуха на охлаждение, его оптимизация. Подвод охлаждающего воздуха к элементам ротора и статора. Ос-новные способы охлаждения лопаток.</p> <p>Способы формирования внутренних поло-стей и каналов в лопатках, вывод охлаждающего воздуха в проточную часть. Теплозащитные покрытия лопаток.</p> <p>Материалы, применяемые для изготовления основных элементов турбин.</p> <p>Тема 3. Конструкция основных камер сгорания ГТД. Основные требования к конструкции основных камер сгорания ГТД и про-блемы решаемые при их проектировании. Классификация камер сгорания по конструкции, направлению движения газов, способу подачи топлива, числу зон горения.</p>				

Наименование разделов дисциплины с кратким содержанием	Объем аудиторных занятий по видам в часах			Объем внеаудиторных занятий по видам в часах
	Л	ЛР	ПЗ	СРС
<p>Особенности рабочего процесса в камерах, обуславливающие ее кон-струкцию. Основные элементы конструкции камер сгорания, условия их работы и характер нагружения. Основные направления развития конструкции камер сгорания Пути снижения выброса вредных веществ. Основные элементы камер сгорания: диффузоры, стабилизаторы горения, жаровые трубы, корпусов. Топливные форсунки. Системы розжига камер сгорания. Материалы, применяемые для основных элементов конструкции камер сгорания. Перспективные жаростойкие материалы для жаровых труб.</p> <p>Охлаждение элементов камер сгорания. Дефекты камер сгорания, обуслов-ленные недостатками конструкции.</p> <p>Тема 4. Конструкция форсажных камер. Назначение ФК. Основные требования к конструкции форсажных камер сгорания. Условия их работы и характер нагружения. Основные элементы форсажных камер: диффузоры, корпуса, системы стабилизации фронта пламени, системы подачи топлива в ФК. Охлаждение элементов ФК . Перспективы развития конструкции форсажных камер сгорания. Материалы для форсажных камер сгорания.</p> <p>Тема 5. Конструкция выходных устройств. Назначение ВУ. Типы реактивных сопел: дозвуковые и сверхзвуковые, ре-гулируемые и нерегулируемые. Конструкция нерегулируемых дозвуковых реактивных сопел. Конструкция и крепление обтекателей. Конструкция и крепление смесителей. Конструкция регулируемых сверхзвуковых сопел. Материалы, применяемые для сопел. Перспективы применения композиционных материалов для сопел. Устройства для реверса тяги, назначение и требования, предъявляемые к ним. Конструкция реверсивных устройств, расположенных до реактивного сопла и за ним. Условия их работы и нагружения. Механизм управления створками реверсивного устройства.</p> <p>Выходные устройства наземных газотурбинных установок.</p> <p>Тема 6. Опоры роторов. Системы смазки Назначение опор роторов. Основные требования к опорам. Классификация опор ГТД. Основные элементы опор.</p> <p>Условия работы подшипников. Требования, предъявляемые к ним. Типы подшипников, применяемые в ГТД. Радиально-упорные</p>				

Наименование разделов дисциплины с кратким содержанием	Объем аудиторных занятий по видам в часах			Объем внеаудиторных занятий по видам в часах
	Л	ЛР	ПЗ	СРС
шариковые подшипники. Конструктивное исполнение. Радиальные роликовые подшипники. Конструктивное исполнение. Специальные подшипники ГТД. Сепараторы подшипников качения. Обеспечение соосности сепаратора. Посадка подшипников на вал и в корпус. Смазка и охлаждение подшипников. Применяемые масла. Понятие о расчете теплового режима подшипников. Оценка потребного циркуляционного расхода масла. Уплотнение масляных полостей. Системы смазки ГТД. Требования. Типы систем смазки. Основные элементы систем смазки, их назначение.				
ИТОГО по 9-му семестру	32	36	0	72
10-й семестр				
Статическая прочность элементов ГТД	14	16	0	64
Тема 7. Статическая прочность рабочих лопаток компрессоров и турбин Расчетные схемы лопаток, нагрузки и условия работы. Модели поведения материала. Модели напряженного состояния. Расчет лопатки на статическую прочность на основе стержневой модели. Основные допущения. Напряжения растяжения от центробежных сил. Факторы, влияющие на напряжения растяжения. Изгибающие моменты и напряжения изгиба от газодинамических сил, их распределение по сечению лопатки и по радиусу. Факторы, влияющие на напряжения изгиба от центробежных сил. Компенсация изгибающих моментов от газодинамических сил изгибающими моментами центробежных сил. Изгибающие моменты и напряжения изгиба от центробежных сил, их распределение по сечению и по радиусу. Изгибающие моменты, создаваемые центробежными силами, действующими на бандажную полку. Суммарные напряжения от растяжения и изгиба, их изменение в зависимости от режима работы двигателя. Предельные напряжения. Запас статической прочности лопаток. Основы методики оценки циклической долговечности рабочих лопаток. Особенности расчета неравномерно нагретых по сечению лопаток с учетом температурных напряжений. Особенности расчета лопаток вентилятора. Расчет крепления лопаток замками «елочного» типа и «ласточкин хвост». Тема 8. Статическая прочность дисков ГТД.				

Наименование разделов дисциплины с кратким содержанием	Объем аудиторных занятий по видам в часах			Объем внеаудиторных занятий по видам в часах
	Л	ЛР	ПЗ	СРС
<p>Расчетные схемы дисков, нагрузки и условия работы. Модели поведения материала. Модели напряженного состояния.</p> <p>Система дифференциальных уравнений, описывающих осесимметричное плоско-напряженное состояние диска. Граничные условия. Решения в пере-мещениях и напряжениях, применение метода конечных разностей. Характер распределения компонент напряжений по радиусу диска. Влияние централь-ного отверстия на распределение напряжений.</p> <p>Понятие о расчете дисков, находящихся в упруго-пластическом состоя-нии. Влияние пластических деформаций на напряженное состояние диска. Автофретирование дисков. Запас прочности по напряжениям (по местной прочности). Запас прочности дисков по разрушающей частоте вращения (по несущей способности). Расчет дисков по разрушающей частоте вращения (по несущей способности). Запас по циклической долговечности диска.</p> <p>Понятие о расчете дисков методом конечных элементов. Постановка и пути решения задачи оптимального проектирования дисков.</p>				
Колебания и динамическая прочность ГТД	14	16	0	52
<p>Тема 9. Колебания и сопротивление разрушению от многоциклового усталости лопаток и дисков компрессоров и турбин.</p> <p>Проблема обеспечения динамической прочности лопаток при проектировании и доводке авиационного ГТД.</p> <p>Собственные и вынужденные колебания лопаток. Формы колебания лопа-ток. Частоты собственных колебаний лопаток. Определение низшей частоты собственных колебаний энергетическим методом (метод Релея). Влияние кон-структивных и эксплуатационных факторов на частоты собственных колеба-ний.</p> <p>Источники возбуждения колебаний лопаток. Частоты, амплитуды возбуж-дающих сил, факторы, влияющие на них. Вращающийся срыв, как источник возбуждения колебаний. Резонансные колебания рабочих лопаток, резонанс-ные диаграммы. Отстройка от резонансных режимов. Демпфирование колебаний лопаток. Способы уменьшения вибрационных напряжений в лопатках. Аэроупругость элементов ГТД. Автоколебания лопаток.</p> <p>Экспериментальное исследование колебаний лопаток.</p> <p>Сопротивление разрушению от многоциклового</p>				

Наименование разделов дисциплины с кратким содержанием	Объем аудиторных занятий по видам в часах			Объем внеаудиторных занятий по видам в часах
	Л	ЛР	ПЗ	СРС
<p>усталости лопаток, запас усталостной прочности. Колебания дисков. Собственные формы колебаний, и собственные частоты колебаний дисков. Влияние эксплуатационных и конструктивных факторов на собственные частоты и формы колебаний дисков. Стоячая и бегущая волна. Резонансная диаграмма. Тема 10. Динамика роторов. Вибрации ГТД. Критическая частота вращения ротора. Уравнения динамики одномассового ротора. Поступательные и угловые перемещения. Виды прецессии. Особенности несимметричных роторов. Влияние гироскопического момента. Демпфирование колебаний ротора. Влияние податливости опор на критические частоты вращения ротора. Конструкция и принцип действия упруго-демпферных опор. Ротор с распределенными параметрами. Особенности колебаний системы ротор-корпус. Источники возмущающих сил и спектр вибрации. Параметры вибрации и единицы изменения. Статистические характеристики вибрации. Измерение и нормирование вибрации. Балансировка роторов. Изменение вибрации под действием внешних и внутренних факторов. Мониторинг вибрации двигателя. Вибродиагностика. Тема 11. Прочность, устойчивость и колебания корпусов. Расчетные схемы корпусов. Расчет напряжений в корпусах двигателя. Расчетные режимы. Общие и местные напряжения. Критерии прочности. Расчет напряжений в оболочках. Статические испытания корпусов газотурбинных двигателей (ГТД). Понятие о расчетах оболочек на устойчивость. Формы колебаний оболочек. Частоты собственных колебаний оболочек. Факторы, влияющие на частоту собственных колебаний. Источники возбуждения колебаний оболочек. Частоты возбуждающих сил. Резонансные колебания оболочек. Методы отстройки от опасных резонансных колебаний. Расчет элементов подвески. Локализация разрушений.</p>				
ИТОГО по 10-му семестру	28	32	0	116
ИТОГО по дисциплине	60	68	0	188

Тематика примерных лабораторных работ

№ п.п.	Наименование темы лабораторной работы
1	Изучение конструкции компрессоров ГТД
2	Изучение конструкции турбин ГТД
3	Изучение конструкции камер сгорания ГТД
4	Изучение конструкции форсажных камер ГТД
5	Изучение конструкции выходных и реверсивных устройств ГТД
6	Изучение конструкции опор и систем смазки ГТД
7	Расчетное исследование статического напряженного состояния рабочих лопаток
8	Расчетное исследование статического напряженного состояния дисков ГТД. Расчет запаса по разрушающей частоте вращения
9	Расчетное исследование колебаний рабочих лопаток ГТД. Построение резонансной диаграммы
10	Экспериментальное исследование колебаний рабочих лопаток ГТД
11	Экспериментальное исследование критических режимов вращения ротора ГТД

Тематика примерных курсовых проектов/работ

№ п.п.	Наименование темы курсовых проектов/работ
1	Проект конструкции узла компрессора (турбины) низкого (высокого) давления двухконтурного газотурбинного двигателя (ТРД, РВад) для пассажирского самолета (для наземной газотурбинной установки) тягой ___ кН (мощностью ___ МВт)

5. Организационно-педагогические условия

5.1. Образовательные технологии, используемые для формирования компетенций

По всем темам дисциплины проводятся проблемно-ориентированные лекционные занятия с использованием мультимедийной презентации лекционного курса. Проведение лекционных занятий по дисциплине основывается на активном методе обучения, при которой учащиеся не пассивные слушатели, а активные участники занятия, отвечающие на вопросы преподавателя. В процессе изложения лекционного материала предусматривается определенная гибкость с акцентированием внимания студентов на наиболее интересных для студентов вопросах. Вопросы преподавателя нацелены на активизацию процессов усвоения материала. Преподаватель заранее намечает список вопросов, стимулирующих ассоциативное мышление и установления связей с ранее освоенным ма-териалом.

После изучения темы дисциплины в часы лекционных занятий студенты в часы самостоятельной работы должны повторить по конспектам лекций материал, пользуясь основной и дополнительной литературой либо более глубоко разобраться в проблемных вопросах, на которые акцентировано внимание лектора, либо изучить материал, не требующий специальных пояснений преподавателя.

Лабораторные работы охватывают первый, второй и третий модуль со-держания дисциплины и выполняются как в часы лабораторных занятий, так и часы самостоятельной работы. Проведение лабораторных занятий основывается на интерактивном методе обучения, при котором учащиеся взаимодействуют не только с преподавателем, но и друг с другом. В часы лабораторных занятий выполняются этапы работ, непосредственно связанные с использованием макетов, лабораторного оборудования, экспериментальных установок и т.д. В эти же часы проводятся необходимые обсуждения и дискуссии по содержательной части работы. Большая часть лабораторных занятий проводится в интерактивном режиме живого общения с преподавателем.

5.2. Методические указания для обучающихся по изучению дисциплины

При изучении дисциплины обучающимся целесообразно выполнять следующие рекомендации:

1. При изучении теоретического материала дисциплины необходимо опираться на знания, приобретенные при изучении предшествующих дисциплин учебного плана. Необходимо демонстрировать применение полученных ранее знаний при изучении данной дисциплины.

2. Изучение учебной дисциплины должно вестись систематически.

3. Изучение теоретического материала на лекционных занятиях должно сопровождаться конспектированием с целью лучшего усвоения и возможности последующего повторения и углубленного изучения.

4. После изучения каждой темы в часы аудиторных занятий необходимо самостоятельно углубленно вникнуть в материал темы используя основную и дополнительную литературу.

5. При появлении непонятных вопросов при самостоятельной работе необходимо обратиться за разъяснениями к преподавателю в часы консультаций.

6. После изучения какой-либо темы по учебнику или конспектным материалам рекомендуется по памяти воспроизвести основные термины, определения, понятия раздела, воспроизвести необходимые схемы и эскизы.

7. При выполнении лабораторных работ выполнять требования преподавателя. Детально разбираться в поставленных задачах, используя все имеющиеся технические средства и документацию.

8. При составлении отчетов по лабораторным работам следует уделить особое внимание полноте изложения материала, технической грамотности изложения, качеству приводимых иллюстраций.

9. Тематика вопросов, изучаемых самостоятельно, задается на лекциях преподавателем. Им же даются источники (в первую очередь вновь изданные в периодической научной литературе) для более детального понимания вопросов, озвученных на лекции.

6. Перечень учебно-методического и информационного обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине

6.1. Печатная учебно-методическая литература

№ п/п	Библиографическое описание (автор, заглавие, вид издания, место, издательство, год издания, количество страниц)	Количество экземпляров в библиотеке
1. Основная литература		
1	Конструкция и проектирование авиационных газотурбинных двигателей : учебное пособие для вузов / Вьюнов С. А., Гусев Ю. В., Карпов А. В., Ковалевская А. Е. Москва : Машиностроение, 1989. 565 с.	25
2	Нихамкин М. А., Воронов Л. В. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. Вопросы и задачи : учебное пособие для вузов. Пермь : Изд-во ПГТУ, 2005. 141 с.	128
3	Нихамкин М. Ш. Конструкция и проектирование газотурбинных двигателей наземного применения : конспект лекций. Пермь : Изд-во ПНИПУ, 2011. 92 с. 7,58 усл. печ. л.	5
4	Нихамкин М.А., Зальцман М.М. Конструкция основных узлов двигателя ПС-90А : учебное пособие для вузов. 2-е изд., испр. и доп. Пермь : Изд-во ПГТУ, 2002. 110 с.	133

5	Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. Автоматика и регулирование авиационных двигателей и энергетических установок. М. : Машиностроение, 2008. 186 с.	40
6	Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. Динамика и прочность авиационных двигателей и энергетических установок. М. : Машиностроение, 2008. 191 с.	38
7	Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. Зубчатые передачи и муфты. Пусковые устройства. Трубопроводные и электрические коммуникации. Уплотнения. Силовой привод. Шум. Автоматизация проектирования и поддержки жизненного цикла. М. : Машиностроение, 2008. 226 с.	40
8	Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. Компрессоры. Камеры сгорания. Форсажные камеры. Турбины. Выходные устройства. М. : Машиностроение, 2008. 367 с.	39
9	Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. Общие сведения. Основные параметры и требования. Конструктивные и силовые схемы. М. : Машиностроение, 2008. 200 с.	40
2. Дополнительная литература		
2.1. Учебные и научные издания		
1	Зрелов В.А. Отечественные газотурбинные двигатели : Основные параметры и конструктивные схемы учебное пособие. М. : Машиностроение, 2005. 335 с.	68
2	Локай В. И., МаксUTOва М. К., Стрункин В. А. Газовые турбины двигателей летательных аппаратов: теория, конструкция и расчет : учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. Москва : Машиностроение, 1991. 511 с.	19
3	Основы технологии создания газотурбинных двигателей для магистральных самолетов / Братухин А. Г., Решетников Ю. Е., Иноземцев А. А., Никольский Ю. А. Москва : Авиатехинформ, 1999. 553 с.	5
2.2. Периодические издания		
	Не используется	
2.3. Нормативно-технические издания		
	Не используется	
3. Методические указания для студентов по освоению дисциплины		
	Не используется	
4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студента		
	Не используется	

6.2. Электронная учебно-методическая литература

Вид литературы	Наименование разработки	Ссылка на информационный ресурс	Доступность (сеть Интернет / локальная сеть; авторизованный / свободный доступ)
Дополнительная литература	Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника	http://vestnik.pstu.ru/aero/about/inf/	локальная сеть; свободный доступ
Дополнительная литература	Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. Вопросы и задачи	https://elib.pstu.ru/Record/RUPNRPUElib4071	локальная сеть; авторизованный доступ

6.3. Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение, используемое при осуществлении образовательного процесса по дисциплине

Вид ПО	Наименование ПО
Операционные системы	Windows 10 (подп. Azure Dev Tools for Teaching)
Офисные приложения.	Microsoft Office Professional 2007. лиц. 42661567
Системы управления проектами, исследованиями, разработкой, проектированием, моделированием и внедрением	AutoCAD Design Suite Ultimate, академическая лиц., Education Network 3000 concurrent users, ПНИПУ ОЦНИТ 2019
Системы управления проектами, исследованиями, разработкой, проектированием, моделированием и внедрением	КОМПАС-3D V18 Уч.вер.(АКФ, МКМК, лиц.Иж-17-00089)

6.4. Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы, используемые при осуществлении образовательного процесса по дисциплине

Наименование	Ссылка на информационный ресурс
Научная библиотека Пермского национального исследовательского политехнического университета	http://lib.pstu.ru/
Электронно-библиотечная система Лань	https://e.lanbook.com/
Электронно-библиотечная система IPRbooks	http://www.iprbookshop.ru/
Информационные ресурсы Сети КонсультантПлюс	http://www.consultant.ru/

7. Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине

Вид занятий	Наименование необходимого основного оборудования и технических средств обучения	Количество единиц
-------------	---	-------------------

Вид занятий	Наименование необходимого основного оборудования и технических средств обучения	Количество единиц
Курсовой проект	Персональный компьютер	15
Лабораторная работа	Лабораторная установка «Экспериментальное исследование колебаний рабочих лопаток ГТД»	1
Лабораторная работа	Лабораторная установка «Экспериментальное исследование критических режимов вращения ротора ГТД»	1
Лабораторная работа	Макет- разрез двигателя АИ-20А	1
Лабораторная работа	Макет- разрез двигателя ВК-1	1
Лабораторная работа	Макет- разрез двигателя Д-30П	1
Лабораторная работа	Макет- разрез двигателя ТВ2-117	1
Лабораторная работа	Макет-разрез двигателя АМ-3	1
Лабораторная работа	Макет-разрез двигателя Д-20П	1
Лабораторная работа	Макет-разрез прямоточного двигателя	1
Лабораторная работа	Макет-разрез двигателя ПС-90А	1
Лабораторная работа	Макет-разрез двигателя С-300	1
Лабораторная работа	Макет-разрез двигателя ТКС-48	1
Лабораторная работа	Макеты узлов двигателя Д-30Ф-6	1
Лекция	Мультимедийный проектор, экран	1

8. Фонд оценочных средств дисциплины

Описан в отдельном документе

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

УТВЕРЖДЕНО

на заседании кафедры АД
протокол № ___ «___» _____ 202__ г.
Заведующий кафедрой
«Авиационные двигатели»
_____ А. А. Иноземцев

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДИСЦИПЛИНЫ
«Конструкция и проектирование авиационных двигателей и энергетических
установок»

ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине
Приложение к рабочей программе дисциплины

Специальность:	24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей»
Специализация программы специалитета:	«Проектирование авиационных двигателей и энергетических установок»
Квалификация выпускника:	инженер
Выпускающая кафедра:	«Авиационные двигатели»
Форма обучения:	очная

Курс: 5

Семестр: 9,10

Трудоёмкость:

Кредитов по рабочему учебному плану:	10 ЗЕ
Часов по рабочему учебному плану:	360 ч

Виды контроля:

Экзамен: **-10** Диф.зачёт: **- 9** Зачёт: **- нет** Курсовой проект: **- 10** Курсовая работа: **-нет**

Пермь, 2021 г.

Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся является частью (приложением) к рабочей программе дисциплины «Конструкция и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок» и разработан на основании:

- положения о проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся по образовательным программам высшего образования – программам бакалавриата, специалитета и магистратуры в ПНИПУ, утвержденного «29» апреля 2014 г.;
- приказа ПНИПУ от 03.12.2015 № 3363-В «О введении структуры ФОС»;
- рабочей программы дисциплины «Конструкция и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок».

1. Перечень формируемых частей компетенций, этапы их формирования и контролируемые результаты обучения

1.1. Формируемые части компетенций

Согласно КМВ ООП учебная дисциплина Б1.Б.07 «Конструкция и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок» участвует в формировании 3-х компетенций: ПК-2.1, ПК-2.2, ПК-2.4. В рамках учебного плана образовательной программы в 9, 10-м семестре на этапе освоения данной учебной дисциплины формируются следующие дисциплинарные части компетенций:

1. ПК-2.1.Б1.В.07 - Способность проводить прочностные расчеты элементов авиационных двигателей и энергетических установок;
2. ПК-2.2.Б1.В.07 – Способность разрабатывать конструкцию деталей и узлов авиационных двигателей и энергетических установок;
3. ПК-2.4.Б1.В.07 – Способность составлять описания принципов действия и устройства основных узлов и элементов авиационных двигателей и энергетических установок.

1.2. Этапы формирования дисциплинарных частей компетенций, объекты оценивания и виды контроля

Согласно РПД освоение учебного материала дисциплины запланировано в течение двух семестров (9 и 10-го семестра базового учебного плана) и разбито на 3 учебных модуля. В каждом модуле предусмотрены аудиторские лекционные и лабораторные занятия, а также самостоятельная работа студентов. В рамках освоения учебного материала дисциплины формируются компоненты дисциплинарных компетенций *знать, уметь, владеть*, указанные в РПД, и которые выступают в качестве контролируемых результатов обучения (табл. 1.1).

Контроль уровня усвоенных знаний, усвоенных умений и приобретенных владений осуществляется в рамках текущего, рубежного и промежуточного контроля при изучении теоретического материала, выполнении контрольных работ, защитой отчетов по лабораторным работам, дифференцированным зачетом, защитой курсового проекта и экзаменом. Виды контроля сведены в таблицу 1.1.

Таблица 1.1. Перечень контролируемых результатов обучения по дисциплине

Контролируемые результаты обучения по дисциплине (ЗУВы)	Вид контроля					
	Текущий		Рубежный	Промежуточная аттестация		
	КР			Диф. Зачет	КП	Экзамен
Усвоенные знания						
Знает методики проведения прочностных расчётов основных элементов авиационных дви-	КР2,3			С		ТВ

гателей и энергетических установок						
Знает требования к конструкции и конструкцию основных узлов авиационных двигателей и энергетических установок	КР1			С		ТВ
Знает современные методы проектирования основных узлов и элементов авиационных двигателей и энергетических установок	КР1-3			С		ТВ
Знает передовой опыт использования средств автоматизированного проектирования при разработке авиационных двигателей	КР1-3			С		ТВ
Знает научную и техническую терминологию в области авиационных двигателей и энергетических установок	КР1-3			С		ТВ
Знает основные правила составления технических описаний основных узлов и элементов авиационных двигателей и энергетических установок	КР1			С		ТВ
Освоенные умения						
Умеет проводить прочностные расчёты основных элементов авиационных двигателей и энергетических установок с использованием аналитических и численных методов			ОЛР7, 8		КП	ПЗ
Умеет обосновывать выбор конструктивных решений деталей и узлов авиационных двигателей, с точки зрения надежности двигателя			ОЛР1-11		КП	ПЗ
Умеет разрабатывать описания и конструкторскую документацию основных узлов авиационных двигателей и энергетических установок			ОЛР1-6		КП	
Умеет формулировать профессиональным языком проблемы в области авиационных двигателей и энергетических установок			ОЛР1-11		КП	
Умеет составлять технические описания основных узлов и элементов авиационных двигателей и энергетических установок			ОЛР1-6		КП	
Приобретенные владения						
Владеет навыками проведения прочностных расчётов основных элементов авиационных двигателей и энергетических установок с использованием аналитических и численных методов с применением современных программных средств			ОЛР7, 8		КП	ПЗ
Владеет навыками анализа полученных результатов для принятия технических решений			ОЛР7, 11		КП	ПЗ
Владеет навыками разработки конструкции деталей, элементов и узлов авиационных двигателей и энергетических установок			ОЛР1-6		КП	
Владеет навыками технического описания узлов и элементов авиационных двигателей и энергетических установок			ОЛР1-6		КП	

--	--	--	--	--	--	--

КР- контрольная работа, ОЛР- отчет по лабораторной работе, С- собеседование, КП- курсовой проект, ТВ- теоретический вопрос, ПЗ- практическое задание..

2. Виды контроля, типовые контрольные задания и шкалы оценивания результатов обучения

2.1. Текущий контроль

Текущий контроль для оценивания знаниевого компонента дисциплинарных частей компетенций (табл. 1.1) в форме контрольной работы проводится по каждому модулю теоретического материала. Результаты по 4-балльной шкале оценивания заносятся в книжку преподавателя и учитываются в виде интегральной оценки при проведении промежуточной аттестации.

Всего предусмотрено 3 текущих контрольных работ по всем модулям дисциплины

Тематика текущих контрольных работ:

Тема 1-6: Конструкция основных узлов ГТД.

Тема 7, 8: Статическая прочность элементов ГТД.

Тема 9, 10, 11: Колебания и динамическая прочность ГТД

Типовые вопросы для контрольной работы 1 (КР1) текущего контроля усвоенных знаний:

1. Требования к компрессорам ГТД. Классификация. Основные конструктивные схемы компрессоров. Сравнительный анализ.
2. Роторы осевых компрессоров. Расположение относительно опор. Основные типы роторов. Сравнительный анализ.
3. Конструкции ротора компрессора барабанного типа. Соединение основных элементов, центрирование, передача крутящего момента.
4. Конструкции ротора компрессора дискового типа. Соединение основных элементов, центрирование, передача крутящего момента.
5. Конструкции ротора компрессора барабанно-дискового типа. Соединение основных элементов, центрирование, передача крутящего момента.
6. Рабочие лопатки компрессоров. Основные элементы и их назначение. Крепление рабочих лопаток. Сравнительный анализ. Осевая фиксация лопаток.
7. Корпусы осевых компрессоров. Основные конструктивные схемы. Сравнительный анализ. Направляющие аппараты осевых компрессоров. Крепление направляющих лопаток. Материалы элементов компрессора.
8. Мероприятия по предотвращению обледенения входной части компрессора. Мероприятия по предотвращению разрушения лопаток от попадания посторонних предметов.
9. Требования газовым турбинам ГТД. Классификация газовых турбин.

10. Конструктивные схемы газовых турбин одновальных ГТД. Сравнительный анализ.
11. Конструктивные схемы газовых турбин двухвальных ГТД. Сравнительный анализ.
12. Конструктивные схемы газовых силовых турбин турбовальных ГТД. Сравнительный анализ.
13. Роторы газовых турбин. Требования. Соединения основных элементов газовых турбин (дисков с валом, дисков с дисками). Сравнительный анализ.
14. Рабочие лопатки газовых турбин. Условия работы. Требования. Основные элементы лопаток и их назначение. Крепление рабочих лопаток газовых турбин.
15. Тепловое состояние основных элементов газовых турбин ГТД (диски, лопатки). Изменение теплового состояния основных элементов газовых турбин при изменении режима работы двигателя.
16. Охлаждение основных элементов газовых турбин. Способы охлаждения лопаток турбин, сравнительный анализ. Требования к охлаждающему воздуху. Интенсификация охлаждения. Принципы построения систем охлаждения газовых турбин. Материалы основных элементов газовых турбин.
17. Требования к камерам сгорания ГТД. Основные процессы, протекающие в камерах сгорания. Классификация камер сгорания. Конструктивные схемы камер сгорания. Сравнительный анализ.
18. Основные элементы камер сгорания. Назначение. Конструктивное исполнение. Устройства подачи топлива. Системы розжига основных КС.
19. Охлаждение жаровых труб камер сгорания. Фиксация жаровых труб. Материалы основных элементов камер сгорания.
20. Форсажные камеры ГТД. Требования. Классификация. Основные схемы форсажных камер.
21. Основные элементы форсажных камер, их назначение и конструктивное исполнение. Системы подачи топлива в ФК. Системы розжига ФК. Материалы, применяемые для изготовления элементов ФК.
22. Реактивные сопла воздушно-реактивных двигателей. Основные схемы нерегулируемых и регулируемых реактивных сопел воздушно-реактивных двигателей. Области применения. Сравнительный анализ.
23. Реверсивные устройства воздушно-реактивных двигателей. Назначение. Основные требования. Конструктивные схемы реверсивных устройств. Приводы реверсивных устройств.
24. Назначение опор роторов. Основные требования к опорам. Классификация опор ГТД. Основные элементы опор.
25. Условия работы подшипников. Требования, предъявляемые к ним. Типы подшипников, применяемые в ГТД
26. Уплотнение масляных полостей.
27. Системы смазки ГТД. Требования. Типы систем смазки. Основные элементы систем смазки, их назначение.

Типовые вопросы для контрольной работы 2 (КР2) текущего контроля усвоенных знаний:

1. Нагрузки, действующие на лопатки. Расчетные схемы лопаток
2. Напряжения растяжения в профильной части рабочей лопатки от центробежных сил
3. Изгибающие моменты и напряжения изгиба от газодинамических сил
4. Изгибающие моменты и напряжения изгиба от центробежных сил.
5. Компенсация напряжений изгиба от газодинамических сил напряжениями изгиба от центробежных сил. Суммарные напряжения растяжения и изгиба.
6. Температурные напряжения в лопатках
7. Оценка статической прочности и циклической долговечности лопаток
8. Нагрузки, действующие на диски. Расчетные схемы дисков
9. Закономерности напряженного состояния дисков
10. Влияние пластических деформаций. Автофретирование дисков
11. Критерии прочности и долговечности дисков
12. Запас прочности диска по разрушающей частоте вращения
13. Влияние пластических деформаций. Автофретирование дисков.

Типовые вопросы для контрольной работы 3 (КР3) текущего контроля усвоенных знаний:

1. Свободные и вынужденные колебания лопаток. Собственные частоты и формы колебаний лопаток.
2. Расчет собственных частот колебаний лопаток
3. Влияние конструктивных и эксплуатационных факторов на собственные частоты колебаний лопатки
4. Демпфирование колебаний лопаток
5. Вынужденные колебания лопаток. Резонансная диаграмма.
6. Автоколебания лопаток
7. Коэффициент запаса вибрационной прочности лопаток, пути его повышения
8. Динамика одномассового ротора
9. Влияние гироскопического момента на колебания ротора
10. Вынужденные колебания и критические частоты вращения роторов
11. Роторы с распределенными параметрами
12. Факторы, влияющие на колебания ротора
13. Влияние податливости опор на колебания роторов. Упруго-демпферные опоры
14. Параметры вибрации, единицы их измерения
15. Расчетные схемы корпусов. Расчет напряжений в корпусах двигателя. Расчетные режимы.
16. Понятие о расчетах оболочек на устойчивость.
17. Формы колебаний оболочек. Частоты собственных колебаний оболочек.

2.2. Рубежный контроль

Рубежный контроль для комплексного оценивания усвоенных знаний, освоенных умений и приобретенных владений дисциплинарных частей компетенций (табл. 1.1) проводится согласно графику учебного процесса, приведенного в РПД, в форме защиты лабораторных работ (согласно РПД во время изучения каждого модуля учебной дисциплины).

2.2.1. Защита лабораторных работ

Всего запланировано 11 лабораторных работ. Типовые темы лабораторных работ приведены в РПД.

Защита лабораторной работы проводится индивидуально каждым студентом или группой студентов. Типовые шкала и критерии оценки приведены в общей части ФОС программы специалитета.

2.3. Промежуточная аттестация

Допуск к промежуточной аттестации осуществляется по результатам текущего и рубежного контроля. Условиями допуска являются успешная сдача всех лабораторных работ и положительная интегральная оценка по результатам текущего и рубежного контроля. Промежуточная аттестация включает в себя дифференцированный зачет (1-й семестр), защиту курсового проекта и экзамен (2-й семестр).

2.3.1. Дифференцированный Зачет

Зачёт по дисциплине выставляется при собеседовании по итогам проведённого текущего и рубежного контроля, при выполнении всех лабораторных работ и самостоятельной работы.

2.3.2. Защита курсового проекта

Типовые темы курсовых проектов приведены в РПД.

Защита курсового проекта проводится на завершающем этапе изучения дисциплины. Защита курсового проекта проводится в форме публичного доклада индивидуально каждым студентом.

Типовые шкала и критерии оценки приведены в общей части ФОС программы специалитета.

2.3.3. Экзамен

Экзамен по дисциплине проводится в устной форме по билетам. Билет содержит два теоретических вопроса (ТВ) для проверки усвоенных знаний заявленных дисциплинарных компетенций. Для проверки освоенных умений могут использоваться практические задания (ПЗ).

Билет формируется таким образом, чтобы в него попали вопросы, контролируемые уровень сформированности всех заявленных дисциплинарных компетенций. Форма билета представлена в общей части ФОС программы специалитета.

2.3.4. Типовые вопросы и задания для экзамена по дисциплине

Типовые вопросы для контроля усвоенных знаний:

1. Требования к компрессорам ГТД. Классификация. Основные конструктивные схемы компрессоров. Сравнительный анализ.
2. Роторы осевых компрессоров. Расположение относительно опор. Основные типы роторов. Сравнительный анализ.
3. Конструкции ротора компрессора барабанного типа. Соединение основных элементов, центрирование, передача крутящего момента.
4. Конструкции ротора компрессора дискового типа. Соединение основных элементов, центрирование, передача крутящего момента.
5. Конструкции ротора компрессора барабанно-дискового типа. Соединение основных элементов, центрирование, передача крутящего момента.
6. Рабочие лопатки компрессоров. Основные элементы и их назначение. Крепление рабочих лопаток. Сравнительный анализ. Осевая фиксация лопаток.
7. Корпусы осевых компрессоров. Основные конструктивные схемы. Сравнительный анализ. Направляющие аппараты осевых компрессоров. Крепление направляющих лопаток. Материалы элементов компрессора.
8. Мероприятия по предотвращению обледенения входной части компрессора. Мероприятия по предотвращению разрушения лопаток от попадания посторонних предметов.
9. Требования газовым турбинам ГТД. Классификация газовых турбин.
10. Конструктивные схемы газовых турбин одновальных ГТД. Сравнительный анализ.
11. Конструктивные схемы газовых турбин двухвальных ГТД. Сравнительный анализ.
12. Конструктивные схемы газовых силовых турбин турбовальных ГТД. Сравнительный анализ.
13. Роторы газовых турбин. Требования. Соединения основных элементов газовых турбин (дисков с валом, дисков с дисками). Сравнительный анализ.
14. Рабочие лопатки газовых турбин. Условия работы. Требования. Основные элементы лопаток и их назначение. Крепление рабочих лопаток газовых турбин.
15. Тепловое состояние основных элементов газовых турбин ГТД (диски, лопатки). Изменение теплового состояния основных элементов газовых турбин при изменении режима работы двигателя.
16. Охлаждение основных элементов газовых турбин. Способы охлаждения лопаток турбин, сравнительный анализ. Требования к охлаждающему воздуху. Интенсификация охлаждения. Принципы построения систем охлаждения газовых турбин. Материалы основных элементов газовых турбин.
17. Требования к камерам сгорания ГТД. Основные процессы, протекающие в камерах сгорания. Классификация камер сгорания. Конструктивные схемы камер сгорания. Сравнительный анализ.

21. Основные элементы камер сгорания. Назначение. Конструктивное исполнение. Устройства подачи топлива. Системы розжига основных КС.
18. Охлаждение жаровых труб камер сгорания. Фиксация жаровых труб. Материалы основных элементов камер сгорания.
19. Форсажные камеры ГТД. Требования. Классификация. Основные схемы форсажных камер.
20. Основные элементы форсажных камер, их назначение и конструктивное исполнение. Системы подачи топлива в ФК. Системы розжига ФК. Материалы, применяемые для изготовления элементов ФК.
21. Реактивные сопла воздушно-реактивных двигателей. Основные схемы не-регулируемых и регулируемых реактивных сопел воздушно-реактивных двигателей. Области применения. Сравнительный анализ.
22. Реверсивные устройства воздушно-реактивных двигателей. Назначение. Основные требования. Конструктивные схемы реверсивных устройств. Приводы реверсивных устройств.
23. Нагрузки, действующие на лопатки. Расчетные схемы лопаток
24. Напряжения растяжения в профильной части рабочей лопатки от центробежных сил
25. Изгибающие моменты и напряжения изгиба от газодинамических сил
26. Изгибающие моменты и напряжения изгиба от центробежных сил.
27. Компенсация напряжений изгиба от газодинамических сил напряжениями изгиба от центробежных сил. Суммарные напряжения растяжения и изгиба.
28. Температурные напряжения в лопатках
29. Оценка статической прочности и циклической долговечности лопаток
30. Нагрузки, действующие на диски. Расчетные схемы дисков
31. Закономерности напряженного состояния дисков
32. Влияние пластических деформаций. Автофретирование дисков
33. Критерии прочности и долговечности дисков
34. Запас прочности диска по разрушающей частоте вращения
35. Влияние пластических деформаций. Автофретирование дисков
36. Свободные и вынужденные колебания лопаток. Собственные частоты и формы колебаний лопаток.
37. Расчет собственных частот колебаний лопаток
38. Влияние конструктивных и эксплуатационных факторов на собственные частоты колебаний лопатки
39. Демпфирование колебаний лопаток
40. Вынужденные колебания лопаток. Резонансная диаграмма.
41. Автоколебания лопаток
42. Коэффициент запаса вибрационной прочности лопаток, пути его повышения
43. Динамика одномассового ротора
44. Влияние гироскопического момента на колебания ротора
45. Вынужденные колебания и критические частоты вращения роторов
46. Роторы с распределенными параметрами
47. Факторы, влияющие на колебания ротора

48. Влияние податливости опор на колебания роторов. Упруго-демпферные опоры
49. Параметры вибрации, единицы их измерения

Типовые задания для контроля усвоенных умений и владений:

1. Определите напряжения растяжения в корневом сечении рабочей лопатки постоянного по длине сечения при следующих параметрах: $R_1 = 250$ мм, $R_2 = 290$ мм, $\rho = 8,1$ г/см³, $n = 12\ 000$ об/мин.

2. В каком соотношении находятся напряжения растяжения в корневом сечении геометрически одинаковых рабочих лопатках компрессора, изготовленных из стали ($\rho = 7,9$ г/см³), титанового сплава ($\rho = 4,5$ г/см³) и алюминиевого сплава ($\rho = 2,75$ г/см³).

3. В каком соотношении находятся запасы прочности (при учете только напряжений растяжения от центробежных сил) в геометрически одинаковых рабочих лопатках компрессора, изготовленных из стали ($\rho = 7,9$ г/см³, $\sigma_{\text{дл}} = 1350$ МПа); титанового сплава ($\rho = 4,5$ г/см³, $\sigma_{\text{дл}} = 1050$ МПа); алюминиевого сплава ($\rho = 2,75$ г/см³, $\sigma_{\text{дл}} = 490$ МПа)?

4. В каком соотношении находятся напряжения растяжения от центробежных сил в рабочей лопатке турбины на взлетном режиме (12 000 об/мин), номинальном режиме (10 800 об/мин) и режиме малого газа (8000 об/мин).

5. Как изменятся напряжения растяжения в рабочей лопатке постоянного сечения, если изменить площади поперечного сечения на всех радиусах в k раз?

6. Определите напряжения растяжения в корневом сечении рабочей лопатки турбины с неизменной по длине площадью поперечного сечения при окружной скорости среднего сечения лопатки 300 м/с ($R_1 = 290$ мм, $R_2 = 405$ мм, $\rho = 8,1$ г/см³).

7. Постройте эпюру распределения напряжений растяжения по длине лопатки и в корневом сечении от центробежных сил в рабочей лопатке постоянного по длине сечения при $n = 12\ 000$ об/мин, $R_1 = 290$ мм, $R_2 = 405$ мм, $\rho = 8,1$ г/см³.

8. Постройте эпюру распределения напряжений растяжения по длине лопатки от центробежных сил в рабочей лопатке постоянного по длине сечения $F = 1$ см² при $n = 12\ 000$ об/мин, $R_1 = 290$ мм, $R_2 = 405$ мм, $\rho = 8,1$ г/см³ с полкой массой 5 г в сечении, расположенном на радиусе 370 мм.

9. Как изменится напряжение растяжения в корневом сечении рабочей лопатки турбины при введении бандажной полки массой 5 г в периферийном сечении? Принять $n = 15\ 000$ об/мин, $R_2 = 255$ мм, $F = 1,5$ см².

10. Определите интенсивность газодинамической нагрузки на лопатки ра и ру в среднем сечении и изгибающие моменты в корневом сечении (считайте интенсивность нагрузки постоянной по длине лопатки) при следующих исходных данных: $R_1 = 270$ мм, $R_2 = 364$ мм, $C_{1a} = 240$ м/с, $C_{2a} = 189$ м/с, $C_{1u} = -276$ м/с, $C_{2u} = 30$ м/с, $P_1 = 0,293$ МПа, $P_2 = 0,249$ МПа, $G = 96$ кг/с, $z = 81$.

11. Постройте график распределения изгибающего момента от газовых сил по длине рабочей лопатки компрессора в плоскости ее вращения, если интенсив-

ность газовой нагрузки принята постоянной: $p_u = 1$ кгс/см. Определите максимальное значение изгибающего момента. Примите $R_1 = 200$ мм, $R_2 = 250$ мм.

12. Определите максимальный изгибающий момент в меридиональной плоскости от действия центробежных сил в рабочей лопатке при выносе центра тяжести периферийного сечения $x_c = 1$ мм. Примите площадь сечения лопатки $F = 1$ см² постоянной по ее длине, распределение выносов центра тяжести линейным. Примите следующие параметры: $R_1 = 250$ мм, $R_2 = 290$ мм, $\rho = 8,1$ г/см³, $n = 12\ 000$ об/мин.

13. Как изменится изгибающий момент, вызываемый центробежными силами, в корневом сечении титановой рабочей лопатки компрессора при замене ее материала на сталь? Примите для стали $\rho = 7,9$ г/см³, для титанового сплава $\rho = 4,5$ г/см³.

14. Определите, как изменяется изгибающий момент от центробежных сил в корневом сечении рабочей лопатки компрессора в связи с введением в ее конструкцию полки, имеющей вынос центра тяжести в меридиональном сечении $x_c = 1$ мм? Масса полки 5 г, радиус ее центра тяжести 270 мм, частота вращения ротора $n = 12\ 000$ об/мин.

15. Оцените температурные напряжения в характерных точках охлаждаемой лопатки турбины на взлетном режиме при следующих исходных данных: $T_{cp} = 800$ °С, $T_A = 900$ °С, $T_B = 700$ °С, $T_C = 850$ °С, $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, $\alpha = 15 \cdot 10^{-6}$. Воспользуйтесь стержневой моделью лопатки без учета деформаций изгиба.

16. Как изменится запас прочности диска турбины по разрушающей частоте вращения K_{b1} при увеличении максимальной рабочей частоты вращения ротора в 1,1 раза?

17. Как изменится запас прочности диска турбины по разрушающей частоте вращения K_{b1} при увеличении предела прочности материала диска на 20 % ?

18. Определите три низшие собственные частоты изгибных колебаний невращающейся бесплощной лопатки постоянного по длине сечения при следующих параметрах: $E = 115\ 000$ МПа, $\rho = 4,5$ г/см³, $I = 50$ мм⁴, $F = 75$ мм², $L = 50$ мм.

19. Как изменится собственная частота изгибных колебаний рабочей лопатки из сплава на основе никеля, если при нагреве с 20 °С до 1000 °С модуль упругости материала изменится с $2,00 \cdot 10^5$ до $1,24 \cdot 10^5$ МПа? Влиянием центробежных сил на собственную частоту пренебречь.

20. Рабочая лопатка первой ступени компрессора проходит резонансный режим по 6-й гармонике, обусловленный наличием в проточной части шести радиальных стоек при $n = 9000$ об/мин. Определите, удастся ли вывести резонансный режим за пределы рабочего диапазона (5000...11 500 об/мин), если увеличить количество стоек до восьми? Примите $B = 1$.

21. Определите логарифмический декремент колебаний лопатки, если за 20 периодов колебаний их амплитуда уменьшается вдвое.

22. Ротор имеет критическую частоту вращения 7000 об/мин и эксцентриситет массы 1 мм. Определите его прогиб в месте крепления диска при частоте вращения 5000 об/мин. Примите расчетную схему невесомого вала с одним диском, демпфированием и податливостью опор следует пренебречь.

23. Критическая частота вращения однодискового ротора составляет 6000 об/мин. Как она изменится при увеличении массы на 10 % ?

24. Упругий невесомый вал на двух жестких опорах с диском массой 50 кг, расположенным на равном расстоянии от опор, вращается с круговой частотой 12000 об/мин. Критическая частота вращения ротора 15000 об/мин. Определите дополнительные реакции в опорах, связанные с центробежной силой неуравновешенных масс ротора. Ротор имеет дисбаланс 50 кг•мм. Демпфированием и податливостью опор пренебречь.

25. Упругий невесомый вал на двух жестких опорах с диском массой 50 кг, расположенным на равном расстоянии от опор, вращается с круговой частотой 12000 об/мин. Критическая частота вращения ротора 8000 об/мин. Определите дополнительные реакции в опорах, связанные с центробежной силой неуравновешенных масс ротора. Ротор имеет дисбаланс 50 кг•мм. Демпфированием и податливостью опор пренебречь.

26. Невесомый упругий вал с одним диском имеет упругую податливость 10-6 м/Н, массу 100 кг, эксцентриситет 1 мм. Вал имеет ограничитель максимального прогиба в месте крепления диска, имеющий диаметр на 4 мм больше вала. Определите скорости вращения, при которых вал в процессе раскрутки начинает и прекращает опираться на ограничитель.

27. Упругий невесомый вал с диском на двух жестких опорах имеет критическую частоту вращения 6000 об/мин. Упругая податливость вала в жестких опорах 5·10⁻⁸ м/Н. Определите, какую податливость упругих опор нужно обеспечить, чтобы снизить критическую частоту до 4000 об/мин?

28. Упругий невесомый вал с диском на двух жестких опорах имеет жесткость 5·10⁷ Н/м. Масса диска 100 кг. Определите, какую жесткость упругих опор нужно обеспечить, чтобы критическая частота не находилась в диапазоне 5000...6000 об/мин?

2.3.5. Шкалы оценивания результатов обучения на экзамене

Оценка результатов обучения по дисциплине в форме уровня сформированности компонентов *знать, уметь, владеть* заявленных дисциплинарных компетенций проводится по 4-х балльной шкале оценивания путем выборочного контроля во время экзамена. Типовые шкала и критерии оценки результатов обучения при сдаче экзамена для компонентов *знать, уметь и владеть* приведены в общей части ФОС программы специалитета.

3. Критерии оценивания уровня сформированности компонентов и дисциплинарных компетенций

3.1. Оценка уровня сформированности компонентов дисциплинарных компетенций

При оценке уровня сформированности дисциплинарных компетенций в рамках выборочного контроля при экзамене считается, что полученная оценка за ком-

понент проверяемой в билете дисциплинарной компетенции обобщается на соответствующий компонент всех дисциплинарных компетенций, формируемых в рамках данной учебной дисциплины.

Типовые критерии и шкалы оценивания уровня сформированности компонентов дисциплинарных компетенций приведены в общей части ФОС программы специалитета.

3.2. Оценка уровня сформированности дисциплинарных компетенций

Общая оценка уровня сформированности всех дисциплинарных компетенций проводится путем агрегирования оценок, полученных студентом за каждый компонент формируемых компетенций, с учётом результатов текущего и рубежного контроля в виде интегральной оценки по 4-х балльной шкале. Все результаты контроля заносятся в оценочный лист и заполняются преподавателем по итогам промежуточной аттестации.

Форма оценочного листа и требования к его заполнению приведены в общей части ФОС программы специалитета.

При формировании итоговой оценки промежуточной аттестации в виде экзамена используются типовые критерии, приведенные в общей части ФОС программы специалитета.