

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

« 24 » января 20 22 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Дисциплина: _____ Теория и расчет лопаточных машин
(наименование)

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

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

Общая трудоёмкость: _____ 180 (5)
(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

Цель:

Формирование комплекса знаний о газодинамических процессах в лопа-точных машинах авиационного двигателя – компрессоре и турбине, теоретических основах их работы, характеристиках и регулировании; умений и навыков расчёта и проектирования этих узлов двигателя, подготовки отчётов по результатам проектирования.

Задачи:

- формирование знаний
 - требований к параметрам компрессоров и турбин авиационных ГТД;
 - газодинамических и прочностных требований к устройству и конструкции лопаточных машин и их элементов, методов и способов их обеспечения, конструктивные ограничения;
 - принципов работы лопаточных машин и системы основных расчётных уравнений;
 - теоретических основ протекания рабочего процесса компрессоров и турбин авиационных ГТД;
 - основ теории пространственного течения в лопаточных машинах и их элементах;
 - причин неустойчивой работы компрессоров и мероприятий по обеспечению газодинамической устойчивости;
 - характеристик лопаточных машин;
 - устройства лопаточных машин, назначения и теоретических основ функционирования основных конструктивных элементов;
 - теоретических основ формирования проточной части лопаточных машин, лопаточных решёток и профилей пера лопаток;
 - основы базовых методик и последовательности выполнения основных расчётов лопаточных машин;
 - требований к оформлению научно-технических отчётов;
- формирование умений
 - использовать современные программы и пакеты для выполнения расчётов и оформления отчётов;
 - анализировать технико-экономическое совершенство компрессоров и турбин авиационных ГТД;
 - выполнять проектировочные и поверочные расчёты лопаточных машин;
 - оценивать нагруженность, тепловое и прочностное состояние основных элементов лопаточных машин;
 - выбирать материалы, отвечающие требованиям прочности;
 - формулировать условия обеспечения работоспособности лопаточных машин и их элементов;
 - формировать геометрический облик проточной части лопаточных машин и их элементов;
 - объяснить назначение основных конструктивных элементов и обосновать их необходимый состав;
 - создавать отчёты с грамотным описанием хода выполнения работ, обоснованием принимаемых решений и анализом полученных результатов;
- формирование навыков
 - навыками постановки и решения расчётно-теоретических и экспериментальных исследовательских задач;
 - анализа и принятия обоснованных расчётных и проектных решений при разработке компрессоров и турбин авиационных ГТД;
 - выполнения расчётов параметров рабочего процесса и течения рабочего тела в авиационных лопаточных машинах;
 - построения профилей, решёток профилей и пера лопаток ком-прессоров и турбин авиационных ГТД с использованием общего программного обеспечения и средств автоматизированного проектирования;
 - оформления отчётов о результатах исследования, расчёта и проектирования лопаточных машин и их элементов.

1.2. Изучаемые объекты дисциплины

- термогазодинамические процессы, протекающие в лопаточных машинах авиационных двигателей;
- характеристики компрессоров и газовых турбин;
- методы регулирования лопаточных машин.

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-1.2	ИД-1ПК-1.2	Знает: – принцип работы лопаточных машин и системе основных расчетных уравнений; – теоретические основы протекания рабочего процесса компрессоров и турбин авиационных ГТД; – основы теории пространственного течения в лопаточных машинах и их элементах; – причины неустойчивой работы компрессоров и мероприятия по обеспечению газодинамической устойчивости; – характеристики лопаточных машин; – устройство лопаточных машин, назначение и теоретические основы функционирования основных конструктивных элементов; – требования к оформлению научно-технических отчетов.	Знает теоретические основы рабочих процессов в авиационных двигателях и энергетических установках.	Курсовая работа

Компетенция	Индекс индикатора	Планируемые результаты обучения по дисциплине (знать, уметь, владеть)	Индикатор достижения компетенции, с которым соотнесены планируемые результаты обучения	Средства оценки
ПК-1.2	ИД-2ПК-1.2	Умеет: – использовать современные программы и пакеты для выполнения расчётов и оформления отчётов; – анализировать технико-экономическое совершенство компрессоров и турбин авиационных ГТД; – создавать отчёты с грамотным описанием хода выполнения работ, обоснованием принимаемых решений и анализом полученных результатов.	Умеет пользоваться современными вычислительными пакетами для моделирования рабочих процессов в авиационных двигателях и энергетических установках и их агрегатах.	Защита лабораторной работы
ПК-1.2	ИД-3ПК-1.2	Владеть: – навыками постановки и решения расчётно-теоретических и экспериментальных исследовательских задач; – навыками анализа и принятия обоснованных расчётных и проектных решений при разработке компрессоров и турбин авиационных ГТД; – навыками оформления отчётов о результатах исследования, расчёта и проектирования лопаточных машин и их элементов.	Владет навыками постановки и решения расчётно-теоретических и экспериментальных исследовательских задач; анализа и обобщения результатов моделирования при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ при проектировании авиационных двигателей и энергетических установок.	Курсовая работа
ПК-2.1	ИД-1ПК-2.1	Знает: – основы базовых методик и последовательности выполнения основных расчётов лопаточных машин; – газодинамические и прочностные требования к устройству и конструкции лопаточных машин и их элементов, методы и способы их обеспечения, конструктивные ограничения; – требования к	Знает методики и этапность проведения газодинамических, тепловых и прочностных расчётов процессов в авиационных двигателях и энергетических установках.	Экзамен

Компетенция	Индекс индикатора	Планируемые результаты обучения по дисциплине (знать, уметь, владеть)	Индикатор достижения компетенции, с которым соотнесены планируемые результаты обучения	Средства оценки
		<p>параметрам компрессоров и турбин авиационных ГТД;</p> <p>– теоретические основы формирования проточной части лопаточных машин, лопаточных решёток и профилей пера лопаток.</p>		
ПК-2.1	ИД-2ПК-2.1	<p>Умеет:</p> <p>– выполнять проектировочные и поверочные расчёты лопаточных машин;</p> <p>– оценивать нагруженность, тепловое и прочностное состояние основных элементов лопаточных машин;</p> <p>– выбирать материалы, отвечающие требованиям прочности;</p> <p>– формулировать условия обеспечения работоспособности лопаточных машин и их элементов;</p> <p>– формировать геометрический облик проточной части лопаточных машин и их элементов;</p> <p>– объяснить назначение основных конструктивных элементов и обосновать их необходимый состав.</p>	<p>Умеет проводить газодинамические, тепловые и прочностные расчёты авиационных двигателей и энергетических установок и их элементов с использованием аналитических и численных методов исследования.</p>	Защита лабораторной работы
ПК-2.1	ИД-3ПК-2.1	<p>Владеет:</p> <p>– навыками выполнения расчётов параметров рабочего процесса и течения рабочего тела в авиационных лопаточных машинах.</p> <p>– навыками построения профилей, решёток профилей и пера лопаток компрессоров и турбин авиационных ГТД с использованием общего программного обеспечения и средств</p>	<p>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</p>	Курсовая работа

Компетенция	Индекс индикатора	Планируемые результаты обучения по дисциплине (знать, уметь, владеть)	Индикатор достижения компетенции, с которым соотнесены планируемые результаты обучения	Средства оценки
		авто-матизированного проектирования.	анализа полученных результатов для принятия технических решений.	

3. Объем и виды учебной работы

Вид учебной работы	Всего часов	Распределение по семестрам в часах	
		Номер семестра	
		7	8
1. Проведение учебных занятий (включая проведение текущего контроля успеваемости) в форме:	72	54	18
1.1. Контактная аудиторная работа, из них:			
- лекции (Л)	48	34	14
- лабораторные работы (ЛР)	18	18	
- практические занятия, семинары и (или) другие виды занятий семинарского типа (ПЗ)			
- контроль самостоятельной работы (КСР)	6	2	4
- контрольная работа			
1.2. Самостоятельная работа студентов (СРС)	72	54	18
2. Промежуточная аттестация			
Экзамен	36	36	
Дифференцированный зачет			
Зачет	9		9
Курсовой проект (КП)			
Курсовая работа (КР)	18		18
Общая трудоемкость дисциплины	180	144	36

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	СРС
7-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
Раздел 1. Основные понятия, определения и принципы работы	14	3	0	15
<p>Введение</p> <p>Назначение и области применения лопаточных машин.</p> <p>Классификация лопаточных машин: по степени повышения давления, по числу ступеней, по количеству валов, по форме проточной части, по принципу работы. Преимущества и недостатки различных схем.</p> <p>Тема 1. Основные геометрические параметры лопаточных машин и их элементов</p> <p>Базовые понятия: ступень, элементарная ступень, профиль, решётка профилей. Размерные и безразмерные диаметральные параметры.</p> <p>Геометрические параметры профиля: средняя линия и кривизна профиля, толщина профиля и входной/выходной кромок, углы заострения кромок, угол изгиба профиля, ребро атаки и обтекания, хорда.</p> <p>Безразмерные параметры профиля.</p> <p>Тема 2. Основные принципы работы элементарной ступени</p> <p>Два этапа преобразования энергии: кинетическая энергия колеса – кинетическая энергия потока – потенциальная энергия потока (и наоборот).</p> <p>Необходимость поворота потока (изгиба профилей лопаток).</p> <p>Кинематическая степень реактивности. Активные, активно-реактивные и реактивные лопаточные машины. Изменение параметров потока вдоль ступени. Треугольники скоростей при степени реактивности 0, 0.5, 1.</p> <p>Тема 3. Термодинамика процессов сжатия-расширения</p> <p>Применение основных уравнений течения газов в расчётах лопаточных машин. Изображение процессов сжатия-расширения в p-v и T-S координатах.</p> <p>Изображение термодинамических процессов в ступени компрессора и турбины в p-v и T-S координатах при разных значениях степени реактивности.</p>				
Потери в решетке и ступени. КПД лопаточных машин	4	5	0	5
<p>Тема 4. Потери в решетке и ступени. КПД лопаточных машин</p> <p>Профильные потери. Пограничный слой и потери на трение. Потери на отрыв потока от поверхности профиля. Кромочные потери. Волновые потери.</p> <p>Вторичные потери. Потери в парном вихре. Потери</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
от перетеканий в радиальном зазоре (концевые потери). Потери от утечек. Механические потери. Дополнительные потери в тур-бине: потери охлаждения, потери с выходной скоростью. КПД компрессора. Теоретический, затраченный и полезный напоры. Адиабатный КПД и КПД по параметрам торможения. КПД турбины. Адиабатный КПД и его значение для авиационных турбин. Окружной (мощностной) КПД.				
Многоступенчатые лопаточные машины	6	0	0	15
Тема 5. Особенности течения в лопаточных решетках турбин и в многоступенчатых турбинах Изменение давления и скорости вдоль обводов профиля. Особенности изменения параметров потока вдоль многоступенчатых турбин. Турбины со ступенями скорости и со ступенями давления. Парциальные турбины. Оптимальное число ступеней в многоступенчатых турбинах. Тема 6. Многоступенчатые лопаточные машины Необходимость применения многоступенчатых лопаточных машин. Предельные величины напоров (теплоперепадов) и работ одной ступени. Особенности термодинамики многоступенчатых лопаточных машин. Тепловое сопротивление в компрессорах. Возврат тепла в турбинах. КПД многоступенчатых машин в сравнении с КПД ступени, анализ с помощью p-v и T-S диаграмм. Распределение вдоль турбины степени реактивности, КПД ступени, работ, осевых скоростей, высот лопаток.				
Характеристики и особенности работы компрессоров	10	10	0	19
Тема 7. Характеристики и неустойчивая работа осевого компрессора Работа компрессора на нерасчетных режимах: – зависимость КПД от расхода воздуха (осевой скорости); – зависимость работы ступени осевого и центробежного компрессоров от расхода воздуха (осевой скорости); – зависимость степени повышения давления осевых и центробежных компрессоров от расхода воздуха (осевой скорости). Влияние частоты вращения ротора на характер протекания характеристик. Внешние признаки и физическая сущность явления помпажа. Механизмы возникновения помпажа в				

Наименование разделов дисциплины с кратким содержанием	Объем аудиторных занятий по видам в часах			Объем внеаудиторных занятий по видам в часах
	Л	ЛР	ПЗ	СРС
различных условиях: на запуске, при малой частоте вращения ротора, при высокой частоте вращения ротора, во время приемистости и т.п. Вращающийся срыв. Способы регулирования компрессоров. Промежуточный перепуск воздуха. Изменение угла установки лопаток. Применение двухвальной схемы (изменение частоты вращения). Тема 8. Особенности течения в центробежных компрессорах Основные элементы проточной части компрессора. Входные устройства. Течение воздуха в рабочем колесе. Типы рабочих колес и область их применения.				
ИТОГО по 7-му семестру	34	18	0	54
8-й семестр				
Выбор параметров, пространственное моделирование и совместная работа лопаточных машин	12	0	0	18
Тема 9. Выбор геометрических и кинематических параметров Атакоустойчивость и оптимальные углы атаки. Влияние радиуса (толщины) входной кромки на атакоустойчивость, лобовое и волновое сопротивление, прочность и долговечность. Влияние радиуса (толщины) выходной кромки на прочность, ресурс и кромочные потери. Выбор максимальной толщины профиля и ее положения, их зависимость от скорости набегающего потока и кривизны профиля. Влияние формы обводов "корыта" и "спинки" на качество обтекания профиля, безотрывность обтекания и теплообмен с потоком. Угол установки профиля и связь с ним максимальной кривизны профиля и ее положения. Оптимальная и конструктивная густота решетки. Оптимальное отношение окружной скорости вращения колеса и скорости истечения из соплового аппарата турбины. Выбор прочих геометрических и кинематических параметров. Тема 10. Профилирование лопаток по высоте Закон постоянной циркуляции, отрицательная реактивность у корня лопатки. Закон постоянной реактивности, особенности профилирования первой ступени компрессора без ВНА. Закон постоянного угла выхода из соплового аппарата ступени турбины. Построение профилей лопаток осевого компрессора. Особенности построения сверхзвуковых профилей и лопаток.				

Наименование разделов дисциплины с кратким содержанием	Объем аудиторных занятий по видам в часах			Объем внеаудиторных занятий по видам в часах
	Л	ЛР	ПЗ	СРС
Построение профилей лопаток турбины. Общие принципы построения «длинных» лопаток компрессоров и турбин.				
Характеристики турбины. Совместная работа турбины и компрессора	2	0	0	0
Тема 11. Характеристики турбины. Совместная работа турбины и компрессора Понятие о работе ступени при изменившихся параметрах процесса. По-добные режимы работы турбины. Характеристики турбины. Совместная работа турбины и компрессора.				
ИТОГО по 8-му семестру	14	0	0	18
ИТОГО по дисциплине	48	18	0	72

Тематика примерных лабораторных работ

№ п.п.	Наименование темы лабораторной работы
1	Изучение принципа работы, параметров, устройства и конструкции компрессоров (2 занятия).
2	Изучение принципа работы, параметров, устройства и конструкции турбин (2 занятия).
3	Изучение и исследование рабочего процесса в центробежном ком-прессоре (3 занятия).
4	Изучение и исследование характеристик компрессора (2 занятия).

Тематика примерных курсовых проектов/работ

№ п.п.	Наименование темы курсовых проектов/работ
1	«Расчёт и проектирование компрессора газотурбинного двигателя определённого заданием типа»
2	«Расчёт и проектирование турбины газотурбинного двигателя определённого заданием типа».

5. Организационно-педагогические условия

5.1. Образовательные технологии, используемые для формирования компетенций

Проведение лекционных занятий по дисциплине основывается на активном методе обучения, при котором учащиеся не пассивные слушатели, а активные участники занятия, отвечающие на вопросы преподавателя. Вопросы преподавателя нацелены на активизацию процессов усвоения материала, а также на развитие логического мышления. Преподаватель заранее намечает список вопросов, стимулирующих ассоциативное мышление и установление связей с ранее освоенным материалом.

Проведение лабораторных занятий основывается на интерактивном методе обучения, при котором обучающиеся взаимодействуют не только с преподавателем, но и друг с другом. При этом доминирует активность учащихся в процессе обучения. Место преподавателя в интерактивных занятиях сводится к направлению деятельности обучающихся на достижение целей занятия.

При проведении учебных занятий используются интерактивные лекции, групповые дискуссии, ролевые игры, тренинги и анализ ситуаций и имитационных моделей.

5.2. Методические указания для обучающихся по изучению дисциплины

При изучении дисциплины обучающимся целесообразно выполнять следующие рекомендации:

1. Изучение учебной дисциплины должно вестись систематически.
2. После изучения какого-либо раздела по учебнику или конспектным материалам рекомендуется по памяти воспроизвести основные термины, определения, понятия раздела.
3. Особое внимание следует уделить выполнению отчетов по лабораторным работам и индивидуальным комплексным заданиям на самостоятельную работу.
4. Вся 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	Проектный термогазодинамический расчет основных параметров авиационных лопаточных машин : учебное пособие для вузов / Булоусов А.Н., Мусаткин Н.Ф., Радько В.М., Кузьмичев В.С. Самара : Изд-во СамГАУ, 2006. 315 с.	95
2. Дополнительная литература		
2.1. Учебные и научные издания		
1	Абианц В. Х. Теория авиационных газовых турбин. 3-е изд., перераб. и доп. Москва : Машиностроение, 1979. 246 с.	4
2	Белоусов А.Н., Мусаткин Н.Ф., Радько В.М. Теория и расчет авиационных лопаточных машин : учебник для вузов. 2-е изд., испр. и доп. Самара : Изд-во СамГАУ, 2003. 341 с.	90

3	Казанджан П. К., Тихонов Н. Д., Янко А. К. Теория авиационных двигателей. Теория лопаточных машин : учебник для вузов. Москва : Машиностроение, 1983. 217 с.	6
4	Локай В. И., МаксUTOва М. К., Стрункин В. А. Газовые турбины двигателей летательных аппаратов. Теория, конструкция и расчет : учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. Москва : Машиностроение, 1979. 447 с.	3
5	Ронзин В. Д., Генкин Э. Л., Агапов Г. А. Методика расчета многоступенчатой газовой турбины : учебное пособие. Пермь : Изд-во ППИ, 1970. 54 с.	2
6	Теория авиационных газотурбинных двигателей. Ч. 1. Москва : Машиностроение, 1977. 312 с.	32
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/	сеть Интернет; свободный 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

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/

Наименование	Ссылка на информационный ресурс
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
Курсовая работа	Персональные компьютеры	16
Лабораторная работа	Испытательная установка с системой манометров на основе стартера газотурбинного двигателя	16
Лекция	Проектор с экраном	1

8. Фонд оценочных средств дисциплины

Описан в отдельном документе
