

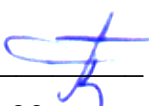
Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования



**Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет**

**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по образовательной  
деятельности

  
\_\_\_\_\_ А.Б. Петроченков  
« 22 » мая \_\_\_\_\_ 20 23 г.

### **РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

**Дисциплина:** \_\_\_\_\_ Моделирование процессов теплообмена  
(наименование)

**Форма обучения:** \_\_\_\_\_ очная  
(очная/очно-заочная/заочная)

**Уровень высшего образования:** \_\_\_\_\_ магистратура  
(бакалавриат/специалитет/магистратура)

**Общая трудоёмкость:** \_\_\_\_\_ 108 (3)  
(часы (ЗЕ))

**Направление подготовки:** \_\_\_\_\_ 24.04.05 Двигатели летательных аппаратов  
(код и наименование направления)

**Направленность:** \_\_\_\_\_ Проектирование и конструкция авиационных двигателей и  
энергетических установок  
(наименование образовательной программы)

# 1. Общие положения

## 1.1. Цели и задачи дисциплины

<p>1.1 Цель учебной дисциплины: Формирование системы знаний, умений и навыков для профессиональной научно-исследовательской и проектно-конструкторской деятельности в области теплового проектирования газотурбинных двигателей (ГТД), разработке и применении математических моделей процессов теплообмена в компрессорах, камерах сгорания и турбинах ГТД.</p> <p>В процессе изучения данной дисциплины студент осваивает следующие профессиональные компетенции:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- способностью разрабатывать физические и математические модели исследуемых процессов, явлений и объектов, относящихся к профессиональной сфере деятельности;</li><li>- способностью разрабатывать физические и математические модели исследуемых процессов, явлений и объектов, относящихся к профессиональной сфере деятельности;</li><li>- способностью проводить технические расчёты по проектам, технико-экономического и функционально-стоимостного анализа эффективности проектируемых изделий и конструкций;</li></ul>
--

## 1.2. Изучаемые объекты дисциплины

<p>Задачи учебной дисциплины:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• изучение теории и особенностей взаимодействия газа и рабочих поверхностей в компрессорах, камерах сгорания и турбинах турбореактивных двигателей; знакомство с методами и подходами к математическому описанию физических процессов в системе движущейся газ-поверхность, в том числе нестационарных;</li><li>• формирование умения проведения расчетов теплового взаимодействия движущегося газа и рабочих поверхностей компрессоров, камер сгорания и турбин ТРД; выбора наиболее подходящих математических аппроксимаций реальных физических процессов в компрессорах, камерах сгорания и турбинах газотурбинных двигателя для решения конкретных задач;</li><li>• формирование навыков применения математического моделирования для определения оптимальных геометрических параметров рабочих поверхностей тракта ГТД; применения математического моделирования для разработки систем охлаждения деталей ГТД.</li></ul>
---

## 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
-------------	-------------------	---	--	-----------------

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-1 ПК-2.2	Знает: - современные программные средства, используемые для теплового и газодинамического проектирования узлов ГТД; - направления возможной тепловой и газодинамической оптимизации узлов ГТД;	Знает методики и этапность проведения газодинамических, тепловых и прочностных расчётов процессов в двигателях и энергетических установках летательных аппаратов	Защита лабораторной работы
ПК-2.2	ИД-2 ПК-2.2	- умеет грамотно поставить задачу для проведения технического расчёта;	Умеет проводить газодинамические, тепловые и прочностные расчёты двигателей и энергетических установок летательных аппаратов и их элементов с использованием аналитических и численных методов исследования	Защита лабораторной работы
ПК-2.2	ИД-3 ПК-2.2	- владеет практическими навыками по проведению технических расчётов узлов ГТД;	Владеет навыками проведения газодинамических, тепловых и прочностных расчётов двигателей и энергетических установок летательных аппаратов и их элементов с использованием аналитических и численных методов исследования с применением современных программных средств и анализа полученных результатов для принятия технических решений	Защита лабораторной работы

### 3. Объем и виды учебной работы

Вид учебной работы	Всего часов	Распределение по семестрам в часах	
		Номер семестра	
		4	
1. Проведение учебных занятий (включая проведение текущего контроля успеваемости) в форме:	36	36	
1.1. Контактная аудиторная работа, из них:			
- лекции (Л)	14	14	
- лабораторные работы (ЛР)	18	18	
- практические занятия, семинары и (или) другие виды занятий семинарского типа (ПЗ)			
- контроль самостоятельной работы (КСР)	4	4	
- контрольная работа			
1.2. Самостоятельная работа студентов (СРС)	72	72	
2. Промежуточная аттестация			
Экзамен			
Дифференцированный зачет			
Зачет	9	9	
Курсовой проект (КП)			
Курсовая работа (КР)			
Общая трудоемкость дисциплины	108	108	

### 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	
4-й семестр				
				СРС

Наименование разделов дисциплины с кратким содержанием	Объем аудиторных занятий по видам в часах			Объем внеаудиторных занятий по видам в часах
	Л	ЛР	ПЗ	СРС
Тепловые нагрузки в газотурбинном двигателе.	5	6	0	24
<p>Введение: Предмет и цель изучения курса «Моделирование процессов теплообмена».</p> <p>Тепловой двигатель как источник тепла. Главное противоречие теплового двигателя, обуславливающее проблему его проектирования. Ограничения по несущей способности конструкционных материалов при высоких температурах. Задача теплового проектирования газотурбинного двигателя. Тема 1. Основные понятия термодинамики. Термодинамические состояние и переход (вынужденный и самопроизвольный). Температура и ее термодинамическое определение. Принцип энергии, определяющий уровень изменения состояния. Теплота и работа. Первый закон термодинамики для движущегося газа. Принцип энтропии, определяющий направление самопроизвольного перехода от неравновесного к равновесному состоянию. Формула Больцмана. Второй закон термодинамики. Тема 2. Тепловые нагрузки в газотурбинном двигателе. Конструкционные материалы и рабочие жидкости, применяемые в ГТД, и допустимые для них уровни температур. Термоциклические нагрузки, их физическая природа и связь с ресурсом работы деталей. Тема 3. Источники тепла в газотурбинном двигателе. Тепловой эффект реакции окисления топлива и его выражение через закон Гесса. Адиабатическое сжатие воздуха в компрессоре и соответствующее повышение температуры по первому закону термодинамики. Фазовое превращение воды. Вязкая диссипация кинетической энергии, превращение ее в тепло.</p>				
Физические основы переноса тепла от газа к стенке.	5	6	0	26
<p>Тема 4. Пограничный слой Закон теплопроводности Фурье и понятие пограничного слоя движущейся жидкости. Уравнение движения жидкости и гидродинамические критерии Рейнольдса и Струхала. Фундаментальная зависимость толщины пограничного слоя от продольной координаты и числа Рейнольдса основного потока. Ламинарный и турбулентный пограничный слои и критерии перехода. Профили скорости ламинарного и турбулентного пограничного слоя. Критерий реламинизации пограничного слоя. Зависимость толщины пограничного слоя от числа Рейнольдса в пограничном слое. Функциональная зависимость толщины пограничного слоя от определяющих</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
переменных. Тема 5. Теплопроводность и радиационный (фотонный) теплообмен. Теплопроводность в твердых телах и при распространении пламени в топливовоздушных смесях. Скорость распространения пламени в ламинарном и турбулентном потоках. Организация горения в камере сгорания и генерация температурной неоднородности потока и повышенной турбулентности. Радиационный перенос энергии от пламени к стенке жаровой трубы. Тема 6. Турбулентность Пульсации скорости потока. Масштаб турбулентности. Уравнение движения плоско-параллельного турбулентного потока. Напряжения Рейнольдса, турбулентная вязкость.				
Охлаждение горячих деталей двигателя	4	6	0	22
Тема 10. Эффективность охлаждения. Критерий эффективности охлаждения в схеме конвективного охлаждения. Лобовое натекание как средство интенсификации охлаждения. Зависимость толщины пограничного слоя (теплого потока) от угла натекания на поверхность. Применение дефлекторов. Пленочное охлаждение. Форма струи охлаждающего воздуха. Факторы, влияющие на эффективность пленочного охлаждения (коэффициент вдува и т.д.). Методы повышения эффективности пленочного охлаждения (форма выходного устройства). Тема 11. Пространственное течение в межлопаточных каналах турбин и его влияние на интенсивность теплоотдачи. Особенности пространственных течений в межлопаточных каналах турбин, обуславливаемых поперечным градиентом давления. Канальный и подковообразный вихри и их взаимодействие. Интерпретация поперечного течения как компоненты лобового натекания. Дрейф горячих пятен потока в межлопаточном канале на поверхности лопатки. Тема 12. Особенности течения во внутренних вращающихся каналах Силы, действующие на поток. Кориолисовы ускорение и сила. Появление поперечного градиента давления и компоненты лобового натекания. Распределение толщины пограничного слоя в канале при течении вверх и вниз на внутренних поверхностях корыта и спинки лопатки.				
ИТОГО по 4-му семестру	14	18	0	72
ИТОГО по дисциплине	14	18	0	72

## Тематика примерных лабораторных работ

№ п.п.	Наименование темы лабораторной работы
1	Исследование источников тепла в газотурбинном двигателе
2	Расчет пограничного слоя вдоль обтекаемых поверхностей лопаток турбины
3	Исследование турбулентности в газотурбинном двигателе
4	Разработка схемы охлаждения горячих деталей ГТД
5	Построение расчетной схемы для определения нестационарного температурного состояния диска компрессора (начальные и граничные условия, понятие о сетке)
6	Построение расчетной схемы для определения нестационарного температурного состояния диска турбины (начальные и граничные условия, понятие о сетке)

### 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 практическим занятиям, 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
<b>1. Основная литература</b>		
1	Физика. Гидродинамика и теплообмен. Пермь : Изд-во ПГТУ, 2007. 94 с.	22
<b>2. Дополнительная литература</b>		
<b>2.1. Учебные и научные издания</b>		
1	Цветков Ф. Ф., Григорьев Б. А. Тепломассообмен : учебное пособие для вузов. 2-е изд., испр. и доп. М. : Изд-во МЭИ, 2005. 549 с.	15
2	Щербинин А. Г., Черняев В. В. Теплопередача : учебное пособие. Пермь : Изд-во ПНИПУ, 2014. 137 с. 8,75 усл. печ. л.	14
<b>2.2. Периодические издания</b>		
1	Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. Пермь : Изд-во ПНИПУ, 2012 -.	
<b>2.3. Нормативно-технические издания</b>		
	Не используется	
<b>3. Методические указания для студентов по освоению дисциплины</b>		
	Не используется	
<b>4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студента</b>		
	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, гл. ред. Бульбович Р.В., 2015-2019, №№ 40-59	<a href="http://vestnik.pstu.ru/aero/about/inf/">http://vestnik.pstu.ru/aero/about/inf/</a>	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)
Прикладное программное обеспечение общего назначения	Dr.Web Enterprise Security Suite, 3000 лиц, ПНИПУ ОЦНИТ 2017
Системы управления проектами, исследованиями, разработкой, проектированием, моделированием и внедрением	ANSYS (лиц. 1062978 )



#### **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	<a href="http://lib.pstu.ru/">http://lib.pstu.ru/</a>
Электронно-библиотечная система Лань	<a href="https://e.lanbook.com/">https://e.lanbook.com/</a>
Электронно-библиотечная система IPRbooks	<a href="http://www.iprbookshop.ru/">http://www.iprbookshop.ru/</a>
Информационные ресурсы Сети КонсультантПлюс	<a href="http://www.consultant.ru/">http://www.consultant.ru/</a>

#### **7. Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине**

Вид занятий	Наименование необходимого основного оборудования и технических средств обучения	Количество единиц
Лабораторная работа	Компьютерный класс - 30 посадочных мест, кафедра АД, ауд. 203, к. Г	1
Лекция	Лекционная аудитория, кафедра АД, ауд. 201, к.г	1

#### **8. Фонд оценочных средств дисциплины**

Описан в отдельном документе
------------------------------