

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



**Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет**

**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по учебной работе

  
\_\_\_\_\_ Н.В.Лобов

« 18 » февраля 20\_\_ г.

### **РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

**Дисциплина:** \_\_\_\_\_ **Тепломассообмен в ракетных двигателях** \_\_\_\_\_  
(наименование)

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

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

**Общая трудоёмкость:** \_\_\_\_\_ **180 (5)** \_\_\_\_\_  
(часы (ЗЕ))

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

**Направленность:** \_\_\_\_\_ **Аэродинамика, гидродинамика и процессы теплообмена  
двигателей летательных аппаратов** \_\_\_\_\_  
(наименование образовательной программы)

## 1. Общие положения

### 1.1. Цели и задачи дисциплины

Целью дисциплины является формирование профессиональных компетенций, связанных с приобретением навыков и умений по математическому моделированию тепловых и газодинамических процессов в ракетных двигателях, формирование научно-технического мировоззрения на основе знания особенностей сложных технических систем, воспитание технической культуры.

Задачи дисциплины:

- ознакомление с современными подходами и методами в области моделирования тепловых и газодинамических процессов;
- изучение методологии расчёта тепломассообмена в ракетных двигателях;
- формирование умения расчёта процессов тепломассообмена с использованием современных компьютерных программ;
- формирование навыков построения математических моделей процессов тепломассообмена в ракетных двигателях и проверки их адекватности.

### 1.2. Изучаемые объекты дисциплины

- процессы тепломассообмена в ламинарном и турбулентном пограничном слое;
- методы расчёта динамического, теплового и диффузионного пограничных слоёв;
- математическое моделирование процессов тепломассообмена в ракетных двигателях.

### 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-1.1	ИД-1ПК-1.1	Знает: – основные понятия теории тепломассообмена и пограничного слоя, критерии подобия для процессов переноса импульса, тепла и вещества, основные подходы к построению моделей для описания процессов тепломассообмена; – методы расчёта тепломассообмена в ракетных двигателях.	Знает теоретические основы рабочих процессов в ракетных двигателях.	Дифференцированный зачет

Компетенция	Индекс индикатора	Планируемые результаты обучения по дисциплине (знать, уметь, владеть)	Индикатор достижения компетенции, с которым соотнесены планируемые результаты обучения	Средства оценки
ПК-1.1	ИД-2ПК-1.1	Умеет пользоваться современными вычислительными пакетами для проведения компьютерных вычислений процессов тепломассообмена в ракетных двигателях	Умеет пользоваться современными вычислительными пакетами для моделирования рабочих процессов в ракетных двигателях и их агрегатах.	Отчёт по практическом у занятию
ПК-1.1	ИД-3ПК-1.1	Владеет навыками постановки исследовательских задач, планированием и проведением вычислений, анализом и обобщением результатов моделирования процессов тепломассообмена в ракетных двигателях.	Владеет навыками постановки исследовательских задач, планирования и проведения вычислений, анализа и обобщения результатов моделирования при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ при проектировании ракетных двигателей.	Защита лабораторной работы
ПК-2.2	ИД-1ПК0-4	Знает методики и этапность проведения газодинамических и тепловых расчётов процессов в ракетных двигателях.	Знает методики и этапность проведения газодинамических, тепловых и прочностных расчётов процессов в ракетных двигателях.	Дифференцированный зачет
ПК-2.2	ИД-2ПК0-4	Умеет: – формулировать критерии и направления оптимизации процессов тепломассообмена; – формулировать конструкторские мероприятия, направленные на обеспечение высокой эффективности тепломассообмена и надёжности узлов и элементов ракетных двигателей.	Умеет проводить газодинамические, тепловые и прочностные расчёты двигателей летательных аппаратов и их элементов с использованием аналитических и численных методов исследования.	Отчёт по практическом у занятию
ПК-2.2	ИД-3ПК0-4	Владеет: – перспективными методиками исследования процессов тепломассообмена и повышением их эффективности; – методами анализа мероприятий, направленных на	Владеет навыками проведения газодинамических, тепловых и прочностных расчётов ракетных двигателей и их элементов с использованием аналитических и численных методов исследования с	Защита лабораторной работы

Компетенция	Индекс индикатора	Планируемые результаты обучения по дисциплине (знать, уметь, владеть)	Индикатор достижения компетенции, с которым соотнесены планируемые результаты обучения	Средства оценки
		повышение эффективности теплообмена и надёжности узлов и элементов ракетных двигателей.	применением современных программных средств и 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	
		3	
1. Проведение учебных занятий (включая проведение текущего контроля успеваемости) в форме:	72	72	
1.1. Контактная аудиторная работа, из них:			
- лекции (Л)	32	32	
- лабораторные работы (ЛР)	18	18	
- практические занятия, семинары и (или) другие виды занятий семинарского типа (ПЗ)	18	18	
- контроль самостоятельной работы (КСР)	4	4	
- контрольная работа			
1.2. Самостоятельная работа студентов (СРС)	108	108	
2. Промежуточная аттестация			
Экзамен			
Дифференцированный зачет	9	9	
Зачет			
Курсовой проект (КП)			
Курсовая работа (КР)			
Общая трудоемкость дисциплины	180	180	

### 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
3-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
Основы теории тепломассообмена	20	8	10	60
<p>Введение</p> <p>История развития ракетных двигателей. Основные элементы ракетного двигателя, теплофизические и диффузионные процессы, проходящие в них. Связь тепломассообмена с другими дисциплинами. Основные задачи теории тепломассообмена.</p> <p>Тема 1. Законы переноса импульса, теплоты и вещества</p> <p>Перенос импульса, теплоты и вещества – следствие скоростной, температурной и концентрационной неравновесности термодинамической системы. Закон Ньютона о вязком трении в жидкости. Закон теплопроводности Фурье. Закон диффузии Фика. Коэффициенты переноса: вязкости (динамический и конвективный), теплопроводности (температуропроводности), диффузии. Единство физических процессов переноса импульса, тепла, вещества. Критерии (числа) Прандтля, Шмидта (диффузионного числа Прандтля), Льюиса-Семёнова.</p> <p>Тема 2. Виды тепломассообмена</p> <p>Виды тепломассообмена: теплопроводность (кондукция), конвекция (свободная и вынужденная), излучение (лучистый или радиационный теплообмен). Сложный теплообмен. Виды массообмена: диффузия и конвекция. Механизм переноса тепла теплопроводностью и вещества диффузией (микродвижение атомов и молекул). Механизм переноса тепла и вещества конвекцией (макродвижение). Перенос тепла излучением (возбуждение атомов и молекул, излучение квантов – электромагнитные волны).</p> <p>Тепломассообмен между твёрдой поверхностью и движущейся вдоль неё жидкостью (газом). Закон теплообмена Ньютона-Рихмана. Коэффициент теплоотдачи (теплопередачи). Коэффициент массоотдачи (массопередачи).</p> <p>Тема 3. Уравнения теплопроводности и диффузии</p> <p>Дифференциальное уравнение теплопроводности. Уравнения Фурье, Пуассона, Лапласа. Мощность теплового источника (стока). Примеры тепловых источников (стоков). Дифференциальное уравнение диффузии. Мощность источника (стока) вещества. Примеры источников (стоков) вещества. Краевые условия. Начальные и граничные условия.</p> <p>Тема 4. Основы теории конвективного тепломассообмена</p> <p>Уравнение неразрывности (сплошности). Уравнения движения невязкой жидкости (уравнение Эйлера) и вязкой жидкости (уравнение</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>Навьё-Стокса). Уравнение энергии. Уравнение диффузии. Начальные и граничные условия. Обезразмеривание уравнений движения, энергии и диффузии. Критерии гомохронности: гидродинамической (число Струхаля), тепловой (число Фурье), диффузионный (диффузионное число гомохронности). Критерии гидродинамического (число Рейнольдса), теплового (число Пекле) и диффузионного (диффузионное число Пекле) подобия. Связь между числами Рейнольдса и Пекле, Рейнольдса и диффузионного Пекле.</p> <p>Тема 5. Понятие о пограничном слое Анализ обезразмеренного уравнения Навьё-Стокса. Две области течения: пограничный слой (тонкий слой, прилегающий к твёрдой поверхности), где силы вязкости существенны и основной поток (внешний поток), где вязкостью можно пренебречь. Основное допущение теории пограничного слоя – «прилипание» жидкости к твёрдой поверхности. Условие применимости допущения о «прилипании» жидкости к поверхности (критерий Кнудсена). Схема погранслоя на плоской пластине. Условная толщина пограничного слоя.</p> <p>Анализ обезразмеренных уравнений теплопроводности и диффузии. Гидродинамический (динамический), тепловой и диффузионный пограничные слои. Схема слоёв. Отношение толщин динамического и теплового, динамического и диффузионного, теплового и диффузионного погранслоёв.</p> <p>Тема 6. Уравнения пограничного слоя Вывод системы дифференциальных уравнений пограничного слоя (уравнения Прандтля). Дифференциальные уравнения погранслоя в случае течения жидкости с теплообменом со стенкой. Дифференциальные уравнения погранслоя в случае течения жидкости с массообменом со стенкой. Оценка толщин динамического, теплового и диффузионного пограничных слоёв. Интегральные уравнения пограничного слоя. Интегральное уравнение импульсов (уравнение Кармана). Толщина вытеснения и толщина потери импульса. Интегральное уравнение энергии. Критерий теплового подобия (число) Стентона. Толщина потери энергии. Интегральное уравнение диффузии. Диффузионный критерий подобия (диффузионное число) Стентона. Толщина потери вещества. Критерии теплового (число Нуссельта) и диффузионного (диффузионное число Нуссельта)</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>подобия. Связь между числами Стентона и Нуссельта, диффузионными числами Стентона и Нуссельта.</p> <p>Тема 7. Расчёт трения и теплообмена в пограничном слое на плоской пластине Ламинарный пограничный слой на плоской пластине. Расчёт распределения скорости, характерных толщин (толщина погранслоя, вытеснения, потери импульса) и коэффициента трения в динамическом погранслое методом Польгаузена. Расчёт распределения температуры, характерных толщин (толщина погранслоя, потери энергии) и коэффициента теплоотдачи в тепловом погранслое. Расчёт распределения концентраций, характерных толщин (толщина погранслоя, потери вещества) и коэффициента массоотдачи в диффузионном погранслое. Связь между трением, теплопроводностью и диффузией. Тройная аналогия. Переход ламинарного погранслоя в турбулентный (схема перехода). Ламинарный подслой. Турбулентный перенос импульса, тепла и вещества. Связь турбулентного переноса с пульсациями скорости (гипотеза Буссинеска), температуры, концентраций. Дополнительная вязкость, теплопроводность и диффузия при турбулентном движении. Теория пути смешения. Путь смешения – аналог длины пробега молекул в газе. Связь величины пульсации с путём смешения. Коэффициенты турбулентного переноса (вязкости, теплопроводности, диффузии). Гипотеза Прандтля для турбулентного погранслоя: пропорциональность пути смешения расстоянию от стенки. Расчёт распределения скорости, температуры, концентраций, характерных толщин, коэффициентов трения и теплообмена в турбулентном погранслое.</p>				
Определение тепловых потоков в ракетном двигателе	12	10	8	48
<p>Тема 8. Конвективный теплообмен в камере сгорания Расчёт коэффициента теплоотдачи. Эффективная температура газа в пограничном слое. Коэффициент восстановления полной температуры. Теплообмен при вдуве газа в погранслои.</p> <p>Тема 9. Конвективный теплообмен в сопле Расчёт коэффициента теплоотдачи. Радиус сопряжения камеры сгорания и сопла. Сравнение тепловых потоков в камере сгорания, критическом и выходном сечениях сопла.</p> <p>Тема 10. Лучистый теплообмен в камере сгорания</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
и сопле Уравнение Стефана-Больцмана. Постоянная Стефана-Больцмана. Эффективная (приведённая степень черноты). Степень черноты газа. Длина пути луча в газе и в запылённом пространстве. Анализ лучистого теплообмена в гомогенных и гетерогенных средах.				
ИТОГО по 3-му семестру	32	18	18	108
ИТОГО по дисциплине	32	18	18	108

### Тематика примерных практических занятий

№ п.п.	Наименование темы практического (семинарского) занятия
1	Обезразмеривание уравнений движения, энергии и диффузии
2	Вывод интегрального уравнения импульсов
3	Расчёт распределения скорости, характерных толщин (толщина погранслоя, вытеснения, потери импульса) и коэффициента трения в ламинарном динамическом пограничном слое
4	Расчёт распределения скорости, характерных толщин и коэффициента трения в турбулентном погранслое
5	Расчётный анализ теплообмена при вдуве высокомолекулярного и низкомолекулярного газов в погранслои

### Тематика примерных лабораторных работ

№ п.п.	Наименование темы лабораторной работы
1	Определение коэффициента теплопередачи и теплового потока в ламинарном погранслое на плоской поверхности
2	Определение коэффициента теплопередачи и теплового потока в турбулентном погранслое на плоской поверхности
3	Определение конвективного теплового потока в камере сгорания РДТТ
4	Определение конвективного теплового потока в критическом сечении и сопле РДТТ
5	Определение лучистого теплового потока в камере сгорания РДТТ

## 5. Организационно-педагогические условия

### 5.1. Образовательные технологии, используемые для формирования компетенций

Проведение лекционных занятий по дисциплине основывается на активном методе обучения, при которой 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 установления связей с ранее освоенным материалом.

Практические занятия проводятся на основе реализации метода обучения действием: определяются проблемные области, формируются группы. При проведении практических занятий преследуются следующие цели: применение знаний отдельных дисциплин и креативных методов для решения проблем и принятия решений; отработка у обучающихся навыков командной работы, межличностных коммуникаций и развитие лидерских качеств; закрепление основ теоретических знаний.

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	Ерохин Б. Т. Теория и проектирование ракетных двигателей : учебник для вузов / Б. Т. Ерохин. - Санкт-Петербург [и др.]: Лань, 2015.	26
<b>2. Дополнительная литература</b>		
<b>2.1. Учебные и научные издания</b>		

1	Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика : учебник для вузов / Г. Н. Абрамович. - Москва: Наука, Физматлит, 1976.	30
2	Алемасов В. Е. Теория ракетных двигателей : учебник для вузов / В. Е. Алемасов, А. Ф. Дрегалин, А. П. Тишин. - М.: Машиностроение, 1989.	28
3	Газодинамические и теплофизические процессы в ракетных двигателях твердого топлива / А.М. Губертов [и др.]. - М.: Машиностроение, 2004.	27
4	Гидродинамика и теплообмен. - Пермь: , Изд-во ПГТУ, 2011. - (Общая физика : учебное пособие; Ч. 4).	80
5	Франк-Каменецкий Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике / Д. А. Франк-Каменецкий. - Москва: Наука, 1987.	6
<b>2.2. Периодические издания</b>		
1	Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника / Пермский национальный исследовательский политехнический университет ; Под ред. В. Ю. Петрова ; Р. В. Бульбовича. - 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	Гидродинамика и теплообмен. - Пермь: , Изд-во ПГТУ, 2011. - (Общая физика : учебное пособие; Ч. 4).	<a href="http://elib.pstu.ru/Record/RUPNRPUelib3229">http://elib.pstu.ru/Record/RUPNRPUelib3229</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)
Офисные приложения.	Microsoft Office Professional 2007. лиц. 42661567
Прикладное программное обеспечение общего назначения	MATHCAD 14 Academic, ПНИПУ 2009 г.
Системы управления проектами, исследованиями, разработкой, проектированием, моделированием и внедрением	ANSYS (лиц. 1062978 )

Вид ПО	Наименование ПО
Системы управления проектами, исследованиями, разработкой, проектированием, моделированием и внедрением	NX Academic Perpetual License Core +CAD +CAE +CAM (договор №P/43469-02-ПНИПУ от 03.12.2015)
Системы управления проектами, исследованиями, разработкой, проектированием, моделированием и внедрением	КОМПАС-3D V14 (лиц.Иж-12-00110)

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

Наименование	Ссылка на информационный ресурс
База данных Scopus	<a href="https://www.scopus.com/">https://www.scopus.com/</a>
База данных Web of Science	<a href="http://www.webofscience.com/">http://www.webofscience.com/</a>
База данных научной электронной библиотеки (eLIBRARY.RU)	<a href="https://elibrary.ru/">https://elibrary.ru/</a>
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	Компьютеры	12
Лекция	Компьютер	1
Лекция	Проектор	1
Практическое занятие	Компьютеры	12

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

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