

## АННОТАЦИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

### «Тепломассообмен в ракетных двигателях»

Дисциплина «Тепломассообмен в ракетных двигателях» является частью программы магистратуры «Аэродинамика, гидродинамика и процессы теплообмена двигателей летательных аппаратов» по направлению «24.04.05 Двигатели летательных аппаратов».

#### **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..

#### **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..

### 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	

### Краткое 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</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>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 теплообмена</p> <p>Уравнение неразрывности (сплошности). Уравнения движения невязкой жидкости (уравнение Эйлера) и вязкой жидкости (уравнение Навье-Стокса). Уравнение энергии. Уравнение диффузии. Начальные и граничные условия.</p> <p>Обезразмеривание уравнений движения, энергии и диффузии. Критерии гомохронности: гидродинамической (число Струхала), 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</p> <p>Анализ обезразмеренного уравнения Навье-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.</p> <p>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</p> <p>Вывод системы дифференциальных</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>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.</p> <p>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) подобия. Связь между числами Стентона и Нуссельта, диффузионными числами Стентона и Нуссельта.</p> <p>Тема 7. Расчёт трения и тепломассообмена в пограничном слое на плоской пластине</p> <p>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 –</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
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 тепломассопередачи в турбулентном погранслое.				
Определение тепловых потоков в ракетном двигателе	12	10	8	48
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 погранслой. 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. Тема 10. Лучистый теплообмен в камере сгорания 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