

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**  
**Директор физтех-школы**  
**аэрокосмических технологий**  
**С.С. Негодяев**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Семинар по теплофизике современных энергетических установок
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Космические технологии Физтех-школа Аэрокосмических Технологий кафедра тепловых процессов
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

- 1 (осенний) - Дифференцированный зачет
- 2 (весенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 90 всего, в том числе:

- лекции: 0 час.
- семинары: 90 час.
- лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: В.В. Кошлаков, д-р техн. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры тепловых процессов 04.06.2020

## Аннотация

Курс "Семинар по теплофизике современных энергетических установок" относится к вариативной части образовательной программы, изучается на 5 курсе.

Изучение данной дисциплины опирается на знания, полученные в процессе освоения дисциплины "Термодинамика", "Газовая динамика", "Теплообмен".

Изучение учебной дисциплины направлено на углубление и расширение базовой профессиональной подготовки магистров, формирование соответствующих компетенций.

В учебной дисциплине рассматриваются основные вопросы обеспечения теплового режима ЭУ, их тепловой защите, методам расчета теплового состояния и уноса материалов проточных трактов.

Студенты узнают, фундаментальные понятия, законы теории теплообмена, теплопроводности, теплофизического и термохимического разрушения материалов, порядки численных величин, характерные для различных аспектов теплофизики ЭУ, современные проблемы теплозащиты ЭУ. Студенты научатся производить численные оценки по порядку величины, видеть в технических задачах физическое содержание, овладеют навыками грамотной обработки результатов опыта и сопоставления с теоретическими данными, практикой исследования и решения теоретических и прикладных задач.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

- формирование базовых знаний по теплофизике ЭУ для использования в решении прикладных задачах ракетно-космической техники;
- формирование исследовательских навыков.

### Задачи дисциплины

- дать студентам базовые знания по вопросам обеспечения теплового режима ЭУ, их тепловой защите, методам расчета теплового состояния и уноса материалов проточных трактов.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1 Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию	ПК-2.1 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в составе научного коллектива

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны знать:

- фундаментальные понятия, законы теории теплообмена, теплопроводности, теплофизического и термохимического разрушения материалов;
- порядки численных величин, характерные для различных аспектов теплофизики ЭУ;
- современные проблемы теплозащиты ЭУ.

уметь:

- пользоваться своими знаниями для решения фундаментальных и прикладных задач и технологических задач;
- делать правильные выводы из сопоставления результатов теории и эксперимента;
- производить численные оценки по порядку величины;
- видеть в технических задачах физическое содержание;
- осваивать новые предметные области, теоретические подходы и экспериментальные методики;
- получать наилучшие значения измеряемых величин и правильно оценить степень их достоверности;
- эффективно использовать информационные технологии и компьютерную технику для достижения необходимых теоретических и прикладных результатов.

владеть:

- навыками освоения большого объема информации;
- навыками самостоятельной работы;
- культурой постановки и моделирования физических задач;
- навыками грамотной обработки результатов опыта и сопоставления с теоретическими данными;
- практикой исследования и решения теоретических и прикладных задач.

### 4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

#### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Принципы обеспечения теплового режима ЭУ.		10		5
2	Конвективный теплообмен при высоких скоростях и температурах газового потока.		12		5
3	Перенос тепла внутри теплозащитного покрытия.		8		5
4	Пористое охлаждение.		6		3
5	Физико- химические основы процесса разрушения теплозащитных покрытий.		6		3
6	Сублимирующие и разлагающиеся теплозащитные материалы.		6		3
7	Химическое взаимодействие материала с набегающим газовым потоком.		8		3
8	Плавающие теплозащитные покрытия.		8		3

9	Композиционные теплозащитные материалы.		6		3
10	Тепловая защита в РДТТ.		6		4
11	Тепловая защита ЖРД.		8		4
12	Активные методы охлаждения.		6		4
Итого часов			90		45
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

#### 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

##### Семестр: 1 (Осенний)

##### 1. Принципы обеспечения теплового режима ЭУ.

Различные типы тепловых установок. Энергетические установки и принципы обеспечения теплового режима.

##### 2. Конвективный теплообмен при высоких скоростях и температурах газового потока.

Газодинамическая картина обтекания тела высокоскоростным газовым потоком. Течение в окрестности точки торможения. Физико – химические процессы в сжатом слое. Уравнения многокомпонентного ламинарного пограничного слоя. Коэффициенты переноса. Параметры подобия. Аналогия между тепло- и массообменом и трением. Теплообмен в точке торможения. Каталитическая способность поверхности. Распределение теплового потока по поверхности тела. Теплообмен на плоской пластине в турбулентном пограничном слое. Влияние шероховатости на теплообмен и трение.

##### 3. Перенос тепла внутри теплозащитного покрытия.

Влияние теплового потока на зависимость температуры от времени. Влияние уноса массы с поверхности на температурное поле внутри теплозащитного покрытия. Характерные времена установления автотемпературного и квазистационарного режимов прогрева. Влияние переменности физических свойств на температурное поле внутри теплозащитного покрытия. Влияние внутренних физико – химических превращений на температурное поле в теплозащитном материале. Соотношение между толщинами прогретого и унесенного слоев разрушающейся тепловой защиты.

##### Семестр: 2 (Весенний)

##### 4. Пористое охлаждение.

Структура пористых материалов и гидродинамика течения в порах. Теплопроводность пористых тел. Теплообмен между пористой матрицей и фильтрующей охлаждающей жидкостью. Физические процессы в пристенном слое при вдуве газа в окрестности точки торможения. Аналогия между тепло- и массообменом и трением. Вдув в турбулентный пограничный слой.

##### 5. Физико- химические основы процесса разрушения теплозащитных покрытий.

Понятие об определяющем механизме разрушения. Критерии сравнения разрушающихся теплозащитных материалов. Нестационарное разрушение теплозащитных материалов.

##### 6. Сублимирующие и разлагающиеся теплозащитные материалы.

Сублимирующие материалы. Механизм разложения термопластичных теплозащитных материалов. Зависимость параметров разрушения термопластов от условий во внешнем потоке. Поведение продуктов разложения и скорость разрушения термопластичных материалов. Механизм разрушения термореактивных полимеров (смола).

#### 7. Химическое взаимодействие материала с набегающим газовым потоком.

Три режима окисления высокотемпературных материалов. Кинетический и диффузионный режимы окисления. Сублимационный режим разрушения графита. Влияние состава газа на разрушение графита. Возможность механического уноса массы в экстремальных условиях.

#### 8. Плавающие теплозащитные покрытия.

Постановка задачи об оплавлении однородного стеклообразного материала. Процессы на поверхности раздела стеклообразных материалов и набегающего потока. Зависимость характеристик квазистационарного оплавления от теплофизических свойств стеклообразных материалов и параметров набегающего потока. Приближенные методы расчета параметров разрушения стеклообразных материалов. Особенности уноса массы полупрозрачных стеклообразных материалов.

#### 9. Композиционные теплозащитные материалы.

Влияние состава материала на теплофизические свойства и механизм прогрева и разрушения. Нестационарный прогрев композиционного теплозащитного материала. Процессы на внешней поверхности композиционных материалов (стеклопластиков). Суммарный тепловой эффект поверхностных процессов при взаимодействии композиционного теплозащитного материала с многокомпонентным газовым потоком. Процессы, протекающие в подповерхностном слое покрытия. Влияние механизма разрушения и параметров набегающего потока на квазистационарные характеристики уноса массы композиционных теплозащитных материалов.

#### 10. Тепловая защита в РДТТ.

Конвективный, лучистый теплообмен. Материалы, используемые в тепловой защите их характеристики. Конструктивное оформление критического сечения сопла. Механизм разрушения углерод-углеродного материала в высокотемпературном окислительном потоке. Модель разрушения углепластиков.

#### 11. Тепловая защита ЖРД.

Конвективный, лучистый теплообмен. Регенеративное охлаждение. Завесное охлаждение. Насадки радиационного охлаждения.

#### 12. Активные методы охлаждения.

Саморегулируемая система охлаждения. Система с поджатием охладителя. Система с принудительной подачей охладителя.

### **5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)**

Необходимое оборудование: компьютер и мультимедийное оборудование.

### **6. Перечень рекомендуемой литературы**

Основная литература

1. Ю.В. Полежаев, Ф.Б. Юревич. Тепловая защита. – М.: Энергия, 1976.
2. Ю.В. Полежаев, А.А. Шишков. Газодинамические испытания тепловой защиты. – М. «Промедек», 1992.
3. А.М. Губертов, В.В. Миронов, Л.И. Волкова и др. под редакцией А.С. Коротеева. Газодинамические и тепловые процессы в ракетных двигателях твердого топлива. – М. «Машиностроение», 2004.
4. Е.В. Лебединский, Г.П. Калмыков, С.В. Мосолов и др. . под редакцией А.С. Коротеева. Рабочие процессы в жидкостном ракетном двигателе и их моделирование. – М. «Высшая школа», 1993.

#### Дополнительная литература

1. А.П. Васильев, В.А. Кудрявцев и др. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей. – М. «Высшая школа», 1993.
2. В.Е. Алемасов, А.Ф. Дрегаллин, А.П. Тишин. Теория ракетных двигателей. – М.: «Машиностроение», 1980.
3. М.В. Добровольский. Жидкостные ракетные двигатели. – М.: «Машиностроение», 1968.

### **7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)**

1. <http://www.edu.ru> – федеральный портал «Российское образование».
2. <http://benran.ru> –библиотека по естественным наукам Российской академии наук.

### **8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)**

программное обеспечение: Microsoft Office (Word, Excel, PowerPoint), OpenOffice.

### **9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)**

Успешное освоение курса требует самостоятельной работы студента. В программе курса много времени отведено для работы студента с измерительными приборами.

Самостоятельная работа включает в себя:

- изучение методик измерения и правил работы на измерительных приборах;
- проработку учебного материала (по конспектам, учебной и научной литературе);
- получать наилучшие значения измеряемых величин и правильно оценить степень их достоверности.

Руководство и контроль за самостоятельной работой студента осуществляется в результате анализа результатов измерений лабораторных работ, а также индивидуальных консультаций.

Показателем владения материалом служит умение проводить обработку результатов измерений.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Космические технологии Физтех-школа Аэрокосмических Технологий кафедра тепловых процессов
<b>курс:</b>	<u>1</u>
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

- 1 (осенний) - Дифференцированный зачет
- 2 (весенний) - Дифференцированный зачет

**Разработчик:** В.В. Кошлаков, д-р техн. наук

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1 Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию	ПК-2.1 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в составе научного коллектива

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Семинар по теплофизике современных энергетических установок» обучающийся должен:

### знать:

- фундаментальные понятия, законы теории теплообмена, теплопроводности, теплофизического и термохимического разрушения материалов;
- порядки численных величин, характерные для различных аспектов теплофизики ЭУ;
- современные проблемы теплозащиты ЭУ.

### уметь:

- пользоваться своими знаниями для решения фундаментальных и прикладных задач и технологических задач;
- делать правильные выводы из сопоставления результатов теории и эксперимента;
- производить численные оценки по порядку величины;
- видеть в технических задачах физическое содержание;
- осваивать новые предметные области, теоретические подходы и экспериментальные методики;
- получать наилучшие значения измеряемых величин и правильно оценить степень их достоверности;
- эффективно использовать информационные технологии и компьютерную технику для достижения необходимых теоретических и прикладных результатов.

### владеть:

- навыками освоения большого объема информации;
- навыками самостоятельной работы;
- культурой постановки и моделирования физических задач;
- навыками грамотной обработки результатов опыта и сопоставления с теоретическими данными;
- практикой исследования и решения теоретических и прикладных задач.

### **3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю**

Текущий контроль осуществляется в форме самостоятельных работ или тестов в письменной форме по каждой теме.

Руководство и контроль за самостоятельной работой студента осуществляется в результате анализа итогов контрольных, самостоятельных работ и тестов, а также индивидуальных консультаций.

### **4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся**

Аттестация по дисциплине «Семинар по теплофизике современных энергетических установок» осуществляется в форме дифференцированных зачетов в 9, 10 семестре.

Перечень контрольных вопросов (9 семестр):

1. Поглощение и накопление тепла конденсированными веществами. Конвективное охлаждение.
2. Соотношение между толщинами прогретого и унесенного слоев разрушающейся тепловой защиты.
3. Радиационное охлаждение.
4. Влияние внутренних физико – химических превращений на температурное поле в теплозащитном материале.
5. Охлаждение тел за счет физико-химических превращений на их поверхности.
6. Влияние переменности физических свойств на температурное поле внутри теплозащитного покрытия.
7. Конвективное охлаждение.
8. Характерные времена установления автомодельного и квазистационарного режимов прогрева.
9. Газодинамическая картина обтекания тел высокоскоростным газовым потоком. Течение в окрестности точки торможения.
10. Влияние уноса массы с поверхности на температурное поле внутри теплозащитного покрытия.
11. Аналогия между тепло- и массообменом и трением. Теплообмен в точке торможения.
12. Влияние теплового потока на зависимость температуры от времени.
13. Распределение теплового потока по поверхности тела.
14. Массообменный принцип охлаждения.

Перечень контрольных вопросов (10 семестр):

1. Структура пористых материалов и гидродинамика течения в порах. Теплопроводность пористых тел.
2. Модель разрушения углепластиков в высокотемпературном окислительном потоке.
3. Понятие об определяющем механизме разрушения материала. Критерии сравнения разрушающихся теплозащитных материалов.
4. Постановка задачи об оплавлении однородного стеклообразного материала.
5. Теплообмен между пористой матрицей и фильтрующей охлаждающей жидкостью.
6. Сублимирующие материалы. Механизмы разложения термопластичных теплозащитных материалов.
7. Сопловые насадки радиационного охлаждения.
8. Механизм разрушения термоактивных полимеров (смола).

9. Три режима окисления высокотемпературных материалов. Кинетический и диффузионный режим окисления.
10. Вдув газов в турбулентный пограничный слой.
11. Поведение продуктов разложения и скорость разрушения термопластичных материалов.
12. Сублимационный режим разрушения графита.
13. Материалы, используемые в тепловой защите РДТТ и их характеристики.
14. Возможность механического уноса массы материала в экстремальных условиях.
15. Механизм разрушения углерод-углеродного материала в высокотемпературном окислительном потоке.
16. Завесное охлаждение.

#### Критерии оценивания

оценка «отлично (10)» выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины при ответе экзаменационного билета и ответе на вопросы по программе дисциплины, а также по результатам контрольных работ;

оценка «отлично (9)» выставляется студенту, показавшему систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины при ответе экзаменационного билета и ответе на вопросы по программе дисциплины, а также по результатам контрольных работ;

оценка «отлично (8)» выставляется студенту, показавшему систематизированные, знания учебной программы дисциплины при ответе экзаменационного билета и ответе на вопросы по программе дисциплины, а также по результатам контрольных работ;

оценка «хорошо (7)» выставляется студенту по результатам контрольных работ, если он твердо знает материал экзаменационного билета, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности;

оценка «хорошо (6)» выставляется студенту по результатам контрольных работ, если он знает материал экзаменационного билета, по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе много неточностей;

оценка «хорошо (5)» выставляется студенту по результатам контрольных работ, если он знает материал экзаменационного билета, излагает его, умеет применять полученные знания на практике, не допускает в ответе грубых ошибок;

оценка «удовлетворительно (4)» выставляется студенту по результатам контрольных работ, а также, если во время ответа экзаменационного билета он показал фрагментарный, характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, но при этом он владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения;

оценка «удовлетворительно (3)» выставляется студенту по результатам контрольных работ, а также, если во время ответа экзаменационного билета он показал разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушение логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации;

оценка «неудовлетворительно (2-1)» выставляется студенту по результатам контрольных работ, а также, если во время ответа экзаменационного билета, он показал что не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных понятий дисциплины и не умеет использовать полученные знания при решении типовых практических задач.

#### **5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

Дифференцированный зачет по дисциплине проводится путем организации специального опроса в устной форме по вопросам.

При проведении устного дифференцированного зачета обучающемуся предоставляется 40 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету на устном зачете не должен превышать одного астрономического часа.

Во время проведения зачета при подготовке ответов на билеты, обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины, конспектами лекций и любой другой литературой.

Во время проведения зачета при ответе обучающегося на вопросы по билету он не может пользоваться конспектами лекций и любой другой литературой.