

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

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

**Рабочая программа дисциплины (модуля)**

<b>по дисциплине:</b>	Теоретические основы расчета тепловых процессов в ракетных двигателях на твердом топливе
<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

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 0 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 30 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Количество контрольных работ, заданий: 2

Программу составил: В.В. Миронов, д-р техн. наук, профессор

Программа обсуждена на заседании кафедры тепловых процессов 04.06.2020

## Аннотация

Курс "Теоретические основы расчета тепловых процессов в ракетных двигателях на твердом топливе" относится к вариативной части образовательной программы, изучается на 5 курсе.

Изучение данной дисциплины опирается на знания, полученные в процессе освоения дисциплины "Физическая механика", "Физические процессы в ракетных двигателях на твердом топливе", "Теплообмен".

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

В учебной дисциплине рассматриваются основные вопросы в области моделирования физических процессов в ракетных двигателях твердого топлива; научить студентов подходам к описанию динамики сложных газодинамических и теплоэрозийных процессов.

Студенты изучают устройство и физические процессы, протекающие при функционировании РДТТ, характерные значения величин, определяющих процессы в ракетных двигателях твёрдого топлива, современные подходы к моделированию процессов в ракетных двигателях и пределы их применимости. По окончании курса студенты владеют навыками изучения сложных технических систем с целью построения их математической модели, навыками освоения комплексной информации по физическому явлению, его математической модели и численной реализации.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

- формирование базовых знаний по устройству, функционированию и математическим моделям процессов, протекающим в современных ракетных двигателях твердого топлива, формирование навыков решения прикладных сопряженных газодинамических и теплофизических задач.

### Задачи дисциплины

- дать студентам базовые знания в области моделирования физических процессов в ракетных двигателях твердого топлива; научить студентов подходам к описанию динамики сложных газодинамических и теплоэрозийных процессов.

## 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-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
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-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
---	---

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

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- устройство и физические процессы, протекающие при функционировании РДТТ;
- характерные значения величин, определяющих процессы в ракетных двигателях твёрдого топлива;
- современные подходы к моделированию процессов в ракетных двигателях и пределы их применимости.

уметь:

- использовать фундаментальные знания для решения прикладных задач;
- выполнять оперативные оценки характеристик процессов;
- выделять в технических задачах индивидуальные физические процессы;
- сопрягать математические модели взаимообусловленных физических процессов;
- эффективно использовать вычислительную технику для достижения прикладных результатов.

владеть:

- навыками изучения сложных технических систем с целью построения их математической модели;
- навыками освоения комплексной информации по физическому явлению, его математической модели и численной реализации;
- навыками самостоятельной работы;
- культурой постановки и моделирования физических 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	Свойства и модели горения твёрдых топлив		6		7
2	Свойства и течения двухфазных продуктов сгорания в камерах и соплах		8		7
3	Тепломассообмен в камерах и соплах		8		8
4	Тепловая защита		8		8
Итого часов			30		30
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

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

Семестр: 1 (Осенний)

## 1. Свойства и модели горения твёрдых топлив

Введение. Типы и конструкции РДТТ, общие сведения. Технические характеристики. Особенности рабочего процесса в РДТТ.

Классификация твердых топлив и их свойства. Теплофизические основы расчета горения двухосновных топлив. Модели горения двухосновных топлив.

Смесевые твердые топлива. Теплофизические основы расчета горения смесевых топлив. Модели горения смесевых топлив.

Нестационарные процессы горения топлив. Воспламенение топлив. Эрозионное горение. Вибрационное горение. Теплофизические процессы при гашении топлив.

## 2. Свойства и течения двухфазных продуктов сгорания в камерах и соплах

Состав, термодинамические и теплофизические характеристики продуктов сгорания. Термодинамический расчет параметров продуктов сгорания. Конденсированные продукты сгорания.

Процессы тепло-и массообмена в полидисперсных двухфазных продуктах сгорания. Конвективный и радиационно-конвективный теплообмен в процессах межфазного взаимодействия.

Газовая динамика камер сгорания РДТТ. Течение и теплообмен продуктов сгорания в каналах зарядов. Модели течения. Частные аналитические решения.

Газовая динамика сопел РДТТ. Дозвуковые и трансзвуковые течения. Сверхзвуковые течения. Особенности двухфазных течений в соплах. Физико-математические модели расчета двухфазных течений.

## 3. Тепломассообмен в камерах и соплах

Процессы теплообмена в дозвуковых течениях. Физико-математические модели расчета конвективного теплообмена. Радиационно-конвективный теплообмен.

Процессы теплообмена в трансзвуковых и сверхзвуковых течениях. Физико-математические модели расчета конвективного теплообмена.

Тепломассообмен при искажении профиля сопла. Теплообмен при взаимодействии ударных волн с пограничным слоем.

Теплообмен в соплах при нерасчетных режимах течения продуктов сгорания. Сопряженные задачи теплообмена при отрыве потока.

Теплообмен в камерах и соплах при течении двухфазных продуктов сгорания. Теплообмен при осаждении частиц. Физико-математические модели теплообмена в задачах соударения индивидуальных частиц и осаждения ансамбля частиц.

## 4. Тепловая защита

Тепловая защита РДТТ. Способы тепловой защиты камер сгорания и сопел. Материалы теплозащитных покрытий.

Методы расчета тепловых режимов камер сгорания. Сопряженные задачи теплообмена и теплового состояния конструкции камеры сгорания.

Методы расчета тепловых режимов сопел. Сопряженные задачи теплообмена и теплового состояния конструкции сопла.

Процессы тепломассообмена при разрушении теплозащитных материалов. Физико-математические модели термохимического взаимодействия продуктов сгорания с материалами. Тепловые и термохимические процессы при взаимодействии потоков с материалами.

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

учебная аудитория, оснащенная компьютером и мультимедийным оборудованием (проектор, звуковая система).

## **6. Перечень рекомендуемой литературы**

### **Основная литература**

1. В.Я. Лихушин. Теория теплообмена. Курс лекций. Под редакцией А.М. Губертова, А.В. Иванова. Центр Келдыша, М., 1998 г.
2. Л.Е. Стернин, А.А. Шрайбер. Многофазные течения газа с частицами. М.: Машиностроение, 1994.
3. А.М. Губертов, В.В. Миронов, Л.И. Волкова и др., под редакцией А.С. Коротеева. Газодинамические и теплофизические процессы в ракетных двигателях твердого топлива. Москва, Машиностроение, 2004 г. с. 511.
4. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М., Наука, 1969 г.

### **Дополнительная литература**

1. И.Г. Ассовский. Физика горения и внутренняя баллистика / Ин-т химической физики им. Н.Н. Семёнова. – М.: Наука, 2005.
2. А.М. Губертов, В.В. Миронов, Р.Г. Голлендер и др., под ред. А.С. Коротеева. Процессы в гибридных ракетных двигателях. – М.: Наука, 2008.
3. А.В. Алиев и др. Внутренняя баллистика РДТТ / РАН; под ред. А.М. Липанова и Ю.М. Милехина. – М.: машиностроение, 2007.

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

1. <http://lib.mipt.ru/> – электронная библиотека Физтеха.
2. <http://www.edu.ru> – федеральный портал «Российское образование».
3. <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 «Теоретические основы расчета тепловых процессов в РДТТ» требует некоторой самостоятельной работы студента. В программе курса приведено минимально необходимое время для работы студента над темой.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение и конспектирование рекомендованной литературы,
- проработку учебного материала (по конспектам семинаров, учебной и научной литературе);
- решение задач, предлагаемых студентам на практических занятиях.

Руководство и контроль за самостоятельной работой студента осуществляется в результате анализа устных ответов студентов в течение учебного года.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

**по направлению:** Прикладные математика и физика  
**профиль подготовки:** Космические технологии  
Физтех-школа Аэрокосмических Технологий  
кафедра тепловых процессов  
**курс:** 1  
**квалификация:** магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен

**Разработчик:** В.В. Миронов, д-р техн. наук, профессор

## 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-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
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-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Теоретические основы расчета тепловых процессов в ракетных двигателях на твердом топливе» обучающийся должен:

### знать:

- устройство и физические процессы, протекающие при функционировании РДТТ;
- характерные значения величин, определяющих процессы в ракетных двигателях твёрдого топлива;
- современные подходы к моделированию процессов в ракетных двигателях и пределы их применимости.

### уметь:

- использовать фундаментальные знания для решения прикладных задач;
- выполнять оперативные оценки характеристик процессов;
- выделять в технических задачах индивидуальные физические процессы;
- сопрягать математические модели взаимообусловленных физических процессов;
- эффективно использовать вычислительную технику для достижения прикладных результатов.

### владеть:

- навыками изучения сложных технических систем с целью построения их математической модели;
- навыками освоения комплексной информации по физическому явлению, его математической модели и численной реализации;
- навыками самостоятельной работы;
- культурой постановки и моделирования физических 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 осуществляется в форме экзамена.

Примеры билетов, используемых для проведения экзамена:

Экзаменационный билет № 1

1. Типы и конструкции РДТТ, общие сведения.
2. Технические характеристики. Особенности рабочего процесса в РДТТ.

Экзаменационный билет № 2

1. Классификация твердых топлив и их свойства. Теплофизические основы расчета горения двухосновных топлив.
2. Модели горения двухосновных топлив.

Экзаменационный билет № 3

1. Смесевые твердые топлива. Теплофизические основы расчета горения смесевых топлив.
2. Модели горения смесевых топлив.

Экзаменационный билет № 4

1. Нестационарные процессы горения топлив. Воспламенение топлив. Эрозионное горение. Вибрационное горение.
2. Теплофизические процессы при гашении топлив.

Экзаменационный билет № 5

1. Состав, термодинамические и теплофизические характеристики продуктов сгорания. Термодинамический расчет параметров продуктов сгорания.
2. Конденсированные продукты сгорания.

Экзаменационный билет № 6

1. Процессы тепло-и массообмена в полидисперсных двухфазных продуктах сгорания.
2. Конвективный и радиационно-конвективный теплообмен в процессах межфазного взаимодействия.

Экзаменационный билет № 7

1. Газовая динамика камер сгорания РДТТ.
2. Течение и теплообмен продуктов сгорания в каналах зарядов. Модели течения. Частные аналитические решения.

Экзаменационный билет № 8

1. Газовая динамика сопел РДТТ. Дозвуковые и трансзвуковые течения. Сверхзвуковые течения. Особенности двухфазных течений в соплах.
2. Физико-математические модели расчета двухфазных течений.

Экзаменационный билет № 9

1. Процессы теплообмена в дозвуковых течениях.
2. Физико-математические модели расчета конвективного теплообмена. Радиационно-конвективный теплообмен.

Экзаменационный билет № 10

1. Процессы теплообмена в трансзвуковых и сверхзвуковых течениях.
2. Физико-математические модели расчета конвективного теплообмена.

#### Экзаменационный билет № 11

1. Тепломассообмен при искажении профиля сопла.
2. Теплообмен при взаимодействии ударных волн с пограничным слоем.

#### Экзаменационный билет № 12

1. Теплообмен в соплах при нерасчетных режимах течения продуктов сгорания.
2. Сопряженные задачи теплообмена при отрыве потока.

#### Экзаменационный билет № 13

1. Теплообмен в камерах и соплах при течении двухфазных продуктов сгорания. Теплообмен при осаждении частиц. Физико-математические модели теплообмена в задачах соударения индивидуальных частиц и осаждения ансамбля частиц.
2. Тепловая защита РДТТ. Способы тепловой защиты камер сгорания и сопел. Материалы теплозащитных покрытий.

#### Экзаменационный билет № 14

1. Методы расчета тепловых режимов камер сгорания. Сопряженные задачи теплообмена и теплового состояния конструкции камеры сгорания.
2. Методы расчета тепловых режимов сопел. Сопряженные задачи теплообмена и теплового состояния конструкции сопла.

#### Экзаменационный билет № 15

1. Процессы тепломассообмена при разрушении теплозащитных материалов. Физико-математические модели термохимического взаимодействия продуктов сгорания с материалами.
2. Тепловые и термохимические процессы при взаимодействии потоков с материалами.

#### 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**

При проведении устного экзамена обучающемуся предоставляется 60 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету на устном экзамене не должен превышать двух астрономических часов.

Преподавателю предоставляется право, помимо теоретических вопросов студентам дополнительные вопросы, уточняющие понимание содержания курса.

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

Во время проведения экзамена при ответе обучающегося на вопросы по билету или по программе дисциплины, он не может пользоваться конспектами лекций и любой другой литературой.