

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

« 07 » марта 20 23 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Дисциплина: Моделирование рабочих процессов в ракетных двигателях
(наименование)

Форма обучения: очная
(очная/очно-заочная/заочная)

Уровень высшего образования: специалитет
(бакалавриат/специалитет/магистратура)

Общая трудоёмкость: 180 (5)
(часы (ЗЕ))

Направление подготовки: 24.05.02 Проектирование авиационных и ракетных двигателей
(код и наименование направления)

Направленность: Проектирование ракетных двигателей твёрдого топлива (СУОС)
(наименование образовательной программы)

1. Общие положения

1.1. Цели и задачи дисциплины

Цель – изучение современных методов исследования рабочих процессов в ракетных двигателях (РД).

Задачи дисциплины:

- освоение методов исследования рабочего процесса в РД;
- формирование умения и практических навыков математического и физического моделирования рабочего процесса в РД;
- привитие студентам навыков анализа и создания новых моделей рабочего процесса в РД.

1.2. Изучаемые объекты дисциплины

- математические и физические модели рабочего процесса в РД;
- уравнения рабочего процесса на стационарном и нестационарном режимах работы;
- методы расчета параметров рабочего процесса.

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-1.5	ИД-1ПК-1.5	Знает термодинамические, газодинамические и численные модели рабочего процесса в РД	Знает теоретические основы рабочих процессов в ракетных двигателях твёрдого топлива.	Экзамен
ПК-1.5	ИД-2ПК-1.5	Умеет пользоваться инженерными моделями и современными программными комплексами для моделирования рабочего процесса в РД.	Умеет пользоваться современными вычислительными пакетами для моделирования рабочих процессов в ракетных двигателях твёрдого топлива и их агрегатах.	Расчетно-графическая работа

Компетенция	Индекс индикатора	Планируемые результаты обучения по дисциплине (знать, уметь, владеть)	Индикатор достижения компетенции, с которым соотнесены планируемые результаты обучения	Средства оценки
ПК-1.5	ИД-3ПК-1.5	Владеет навыками проведения исследовательских работ при проектировании РД.	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 твёрдого топлива.	Отчёт по практическом у занятию
ПК-2.8	ИД-1ПК-2.8	Знает методику проведения термодинамических, газодинамических и численных расчетов в РД.	Знает методики и этапность проведения газодинамических, тепловых и прочностных расчётов процессов в ракетных двигателях твёрдого топлива.	Экзамен
ПК-2.8	ИД-2ПК-2.8	Умеет анализировать полученные результаты при моделировании процессов в РД и принятии технических решений.	Умеет проводить газодинамические, тепловые и прочностные расчёты ракетных двигателей твёрдого топлива и их элементов с использованием аналитических и численных методов исследования.	Расчетно-графическая работа
ПК-2.8	ИД-3ПК-2.8	Владеет навыками проведения термодинамических, газодинамических и численных расчетов с применением современных программных средств.	Владеет навыками проведения газодинамических, тепловых и прочностных расчётов ракетных двигателей твёрдого топлива 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	
		7	
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)	72	72	
2. Промежуточная аттестация			
Экзамен	36	36	
Дифференцированный зачет			
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
7-й семестр				
Термодинамические модели	8	6	6	18
Состав и свойства баллистичный твердых ракетных топлив (ТРТ). Состав и свойства смесевых ТРТ. Сравнительный анализ характеристик баллистичный и смесевых ТРТ. Равновесный состав газов. Константа химического равновесия. Уравнения материального баланса. Система уравнений термодинамического расчета процессов горения и истечения. Компонентный и элементный составы топлива и продуктов сгорания. Условная химическая формула. Закон сохранения энтальпии определение термодинамической температуры горения в камере сгорания (КС). Энтальпия топлива и продуктов сгорания. Закон сохранения энтропии и определение термодинамической температуры в сечениях сопла. Энтропия продуктов сгорания в КС и на срезе сопла. Алгоритм терморасчета в КС. Алгоритм терморасчета в сечениях сопла.				

Наименование разделов дисциплины с кратким содержанием	Объем аудиторных занятий по видам в часах			Объем внеаудиторных занятий по видам в часах
	Л	ЛР	ПЗ	СРС
Модели горения твердых ракетных топлив	10	6	6	22
Общие сведения о процессах горения. Структура фронта горения. Толщина фронта пламени и толщина зоны горения. Физическая модель горения баллистичных ТРТ. Физическая модель горения смесевых ТРТ. Математическая модель стационарного газофазного горения ТРТ. Закономерности стационарного горения ТРТ. Методы регулирования скорости горения в РДТТ. Физическая модель нестационарного горения ТРТ. Соотношение времен релаксации в КС и в прогревом слое заряда. Математическая модель нестационарного горения ТРТ. Особенности горения ТРТ в режимах переменного давления. Физическая модель турбулентного горения ТРТ. Математическая модель турбулентного горения ТРТ. Вибрационное горения ТРТ.				
Инженерные модели внутрикамерного процесса	8	6	6	22
Система уравнений нестационарного течения газа вдоль горячей поверхности заряда. Система уравнений установившегося течения газа вдоль горячей поверхности заряда. Одномерная газодинамическая модель внутрикамерного процесса с использованием газодинамических функций. Инженерная газодинамическая модель течения в канале заряда произвольной формы. Инженерная модель течения газа в предопловом объеме. Инженерная модель диффузионного горения распыленного топлива. Распределение капель по размерам. Законы испарения капли. Полное время и длина выгорания капли.				
Численное моделирование внутрикамерного процесса	6	0	0	10
Численная модель внутрикамерного процесса в РДТТ. Модель межфазного взаимодействия в РДТТ. Уравнения движения газа в КС ЖРД в подходе Эйлера. Уравнения движения капель распыленного топлива в КС ЖРД в подходе Лагранжа. Модель межфазного взаимодействия в КС ЖРД. Постановка и реализация граничных условий при численном моделировании внутрикамерного процесса.				
ИТОГО по 7-му семестру	32	18	18	72
ИТОГО по дисциплине	32	18	18	72

Тематика примерных практических занятий

№ п.п.	Наименование темы практического (семинарского) занятия
--------	--

№ п.п.	Наименование темы практического (семинарского) занятия
1	Элементный и компонентный состав ТРТ
2	Условная химическая формула
3	Энтальпия твердых и жидких ракетных топлив
4	Зависимость скорости горения ТРТ от давления в КС, начальной температуры заряда и скорости газового потока вдоль горячей поверхности заряда
5	Влияние скорости горения ТРТ на давление, тягу и удельный импульс
6	Испарение капли жидкого топлива по времени и длине КС
7	Определение времени и длины полного выгорания капли
8	Расчет параметров газа вдоль горячей поверхности заряда

Тематика примерных лабораторных работ

№ п.п.	Наименование темы лабораторной работы
1	Определение термодинамической температуры в КС
2	Определение состава и теплофизических характеристик ПС в КС
3	Экспериментальные изучения характеристик диффузионного горения
4	Экспериментальные изучения характеристик гомогенного горения
5	Определение параметров газа в предсопловом объеме КС
6	Исследование параметров диффузионного горения распыленного топлива

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.

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
1. Основная литература		
1	Давыдов Ю.М. Численное моделирование нестационарных переходных процессов в активных и реактивных двигателях / Ю.М. Давыдов, М.Ю. Егоров. - М.: Нац. Акад. прикл. наук России, 1999.	21

2	Ерохин Б. Т. Теория внутрикамерных процессов и проектирование РДТТ : учебник для вузов / Б. Т. Ерохин. - Москва: Машиностроение, 1991.	55
3	Шишков А. А. Рабочие процессы в ракетных двигателях твердого топлива : справочник / А. А. Шишков, С. Д. Панин, Б. В. Румянцев. - М.: Машиностроение, 1989.	25
2. Дополнительная литература		
2.1. Учебные и научные издания		
1	Виницкий А. М. Ракетные двигатели на твердом топливе : учебное пособие для вузов / А. М. Виницкий. - Москва: Машиностроение, 1973.	35
2	Добровольский М.В. Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования : Учеб. для вузов / М.В.Добровольский. - М.: МГТУ, 2005.	18
2.2. Периодические издания		
	Не используется	
2.3. Нормативно-технические издания		
	Не используется	
3. Методические указания для студентов по освоению дисциплины		
	Не используется	
4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студента		
	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	Гречух И. Н. Жидкостные ракетные двигатели : учеб. пособие / Гречух И. Н., Гречух Л. И. - Омск: ОмГТУ, 2017.	http://elib.pstu.ru/Record/lanRU-LAN-BOOK-149080	сеть Интернет; авторизованный доступ
Дополнительная литература	Евграшин Ю. Б. Проектирование и отработка ракетных двигателей на твёрдом топливе : учебное пособие для вузов / Ю. Б. Евграшин. - Пермь: Изд-во ПГТУ, 2008.	http://elib.pstu.ru/Record/RUPNRPUelib2739	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

Вид ПО	Наименование ПО
Прикладное программное обеспечение общего назначения	Dr.Web Enterprise Security Suite, 3000 лиц, ПНИПУ ОЦНИТ 2017
Прикладное программное обеспечение общего назначения	MATHCAD 14 Academic, ПНИПУ 2009 г.
Системы управления проектами, исследованиями, разработкой, проектированием, моделированием и внедрением	ANSYS (лиц. 1062978)
Системы управления проектами, исследованиями, разработкой, проектированием, моделированием и внедрением	SOLIDWORKS Education Edition (дог.№ L271113-83М от 27.10.2013 каф.ПКТЭС АКФ)
Системы управления проектами, исследованиями, разработкой, проектированием, моделированием и внедрением	КОМПАС-3D V18 Уч.вер.(АКФ, МКМК, лиц.Иж-17-00089)

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	https://www.scopus.com/
База данных Web of Science	http://www.webofscience.com/
База данных научной электронной библиотеки (eLIBRARY.RU)	https://elibrary.ru/
Научная библиотека Пермского национального исследовательского политехнического университета	http://lib.pstu.ru/
Электронно-библиотечная система Лань	https://e.lanbook.com/
Электронно-библиотечная система IPRbooks	http://www.iprbookshop.ru/
Информационные ресурсы Сети КонсультантПлюс	http://www.consultant.ru/

7. Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине

Вид занятий	Наименование необходимого основного оборудования и технических средств обучения	Количество единиц
Лабораторная работа	Компьютер	12
Лекция	Компьютер	1
Лекция	Проектор	1
Практическое занятие	Компьютер	12

8. Фонд оценочных средств дисциплины

Описан в отдельном документе

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
Пермский национальный исследовательский политехнический университет

ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ
для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине
«Моделирование рабочих процессов в ракетных двигателях»

Приложение к рабочей программе дисциплины

Специальность:	24.05.02 Проектирование авиационных и ракетных двигателей
Специализация программы специалитета	Проектирование ракетных двигателей твердого топлива
Квалификация выпускника:	инженер
Выпускающая кафедра:	Ракетно-космическая техника и энергетические системы
Форма обучения:	очная
Специальность:	24.05.02 Проектирование авиационных и ракетных двигателей

Курс: 4

Семестр: 7

Трудоёмкость:

Кредитов по рабочему учебному плану: 5 ЗЕ
Часов по рабочему учебному плану: 180 ч.

Форма промежуточной аттестации:

Экзамен: 7 семестр

Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине является частью (приложением) к рабочей программе дисциплины «Моделирование рабочих процессов в ракетных двигателях». Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине разработан в соответствии с общей частью фонда оценочных средств для проведения промежуточной аттестации основной образовательной программы, которая устанавливает систему оценивания результатов промежуточной аттестации и критерии выставления оценок. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине устанавливает формы и процедуры текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине.

1. Перечень контролируемых результатов обучения по дисциплине, объекты оценивания и виды контроля

Согласно РПД освоение учебного материала дисциплины запланировано в течение одного семестра (7-го семестра учебного плана) и разбито на 4 учебных модуля. В каждом модуле предусмотрены аудиторские лекционные, практические и лабораторные занятия, а также самостоятельная работа студентов. В рамках освоения учебного материала дисциплины формируются компоненты компетенций *знать, уметь, владеть*, указанные в РПД, которые выступают в качестве контролируемых результатов обучения по дисциплине (табл. 1.1).

Контроль уровня усвоенных знаний, усвоенных умений и приобретенных владений осуществляется в рамках текущего, рубежного и промежуточного контроля при изучении теоретического материала, сдаче отчетов по лабораторным работам и экзамена. Виды контроля сведены в таблицу 1.1.

Таблица 1.1. Перечень контролируемых результатов обучения по дисциплине

Контролируемые результаты обучения по дисциплине (ЗУВы)	Вид контроля					
	Текущий		Рубежный		Промежуточный	
	С	ТО	ОЛР	Т/КСР		Экзамен
Усвоенные знания						
3.1 знать термодинамические, газодинамические и численные модели рабочего процесса в РД		ТО1-ТО8		КСР1-КСР3		ТВ
3.2 знать методику проведения термодинамических, газодинамических и численных расчетов в РД		ТО1-ТО8		КСР1-КСР3		ТВ
Освоенные умения						
У.1 уметь пользоваться инженерными моделями и современными программными комплексами для моделирования рабочего процесса в РД			ОЛР1-ОЛР6	КСР1-КСР3		ПЗ
У.2 уметь анализировать полученные результаты при моделировании процессов в РД и принятии технических решений			ОЛР1-ОЛР6	КСР1-КСР3		ПЗ

Контролируемые результаты обучения по дисциплине (ЗУВы)	Вид контроля					
	Текущий		Рубежный		Промежуточный	
	С	ТО	ОЛР	Т/КСР		Экзамен
Приобретенные владения						
В.1 владеть навыками проведения исследовательских работ при проектировании РД			ОЛР1- ОЛР6			КЗ
В.2 владеть навыками проведения термодинамических, газодинамических и численных расчетов с применением современных программных средств			ОЛР1- ОЛР6			КЗ

С – собеседование по теме; ТО – теоретический опрос; ОЛР – отчет по лабораторной работе; Т/КСР – рубежное тестирование (контрольная работа); ТВ – теоретический вопрос; ПЗ – практическое задание; КЗ – комплексное задание экзамена.

Итоговой оценкой достижения результатов обучения по дисциплине является промежуточная аттестация в виде экзамена, проводимая с учетом результатов текущего и рубежного контроля.

2. Виды контроля, типовые контрольные задания и шкалы оценивания результатов обучения

Текущий контроль успеваемости имеет целью обеспечение максимальной эффективности учебного процесса, управление процессом формирования заданных компетенций обучаемых, повышение мотивации к учебе и предусматривает оценивание хода освоения дисциплины. В соответствии с Положением о проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся по образовательным программам высшего образования – программам бакалавриата, специалитета и магистратуры в ПНИПУ предусмотрены следующие виды и периодичность текущего контроля успеваемости обучающихся:

- входной контроль, проверка исходного уровня подготовленности обучаемого и его соответствия предъявляемым требованиям для изучения данной дисциплины;

- текущий контроль усвоения материала (уровня освоения компонента «знать» заданных компетенций) на каждом групповом занятии и контроль посещаемости лекционных занятий;

- промежуточный и рубежный контроль освоения обучаемыми отдельных компонентов «знать», «уметь» заданных компетенций путем компьютерного или бланчного тестирования, контрольных опросов, контрольных работ (индивидуальных домашних заданий), защиты отчетов по лабораторным работам, рефератов, эссе и т.д.

Рубежный контроль по дисциплине проводится на следующей неделе после прохождения модуля дисциплины, а промежуточный – во время каждого контрольного мероприятия внутри модулей дисциплины;

- межсессионная аттестация, единовременное подведение итогов текущей успеваемости не менее одного раза в семестр по всем дисциплинам для каждого направления подготовки (специальности), курса, группы;

- контроль остаточных знаний.

2.1. Текущий контроль усвоения материала

Текущий контроль усвоения материала в форме собеседования или выборочного теоретического опроса студентов проводится по каждой теме. Результаты по 5-балльной шкале оценивания заносятся в книжку преподавателя и учитываются в виде интегральной оценки при проведении промежуточной аттестации.

2.2. Рубежный контроль

Рубежный контроль для комплексного оценивания усвоенных знаний, освоенных умений и приобретенных владений (табл. 1.1) проводится в форме защиты лабораторных работ и рубежных контрольных работ (после изучения каждого модуля учебной дисциплины).

2.2.1. Защита лабораторных работ

Всего запланировано 6 лабораторных работ. Типовые темы лабораторных работ приведены в РПД.

Защита лабораторной работы проводится индивидуально каждым студентом или группой студентов. Типовые шкала и критерии оценки приведены в общей части ФОС образовательной программы.

2.2.2. Контроль самостоятельной работы

Согласно РПД запланировано 4 часа контроля самостоятельной работы (КСР) после освоения студентами учебных модулей дисциплины.

Типовые задания КСР:

1. Рассмотреть систему уравнений для расчета одномерного течения ПС вдоль горячей поверхности заряда
2. Объяснить математическую модель горения ТТ в турбулентном потоке.
3. Применить метод газодинамических функций для определения течения в предсопловом объеме КС.
4. Объяснить способы экспериментального определения скорости горения ТРТ.

Типовые задания КСР:

1. Рассмотреть термодинамическую модель определения параметров ПС в камере сгорания.
2. Объяснить способ определения термодинамической температуры ПС в камере сгорания и на срезе сопла.
3. Предложить теоретические и экспериментальные способы определения состава ПС.
4. Рассмотреть газодинамическую модель определения параметров ПС в камере сгорания.

Типовые задания КСР:

1. Рассмотреть уравнения сохранения в форме Эйлера для газовой (непрерывной) фазы в КС ЖРД.
2. Дать описание спектров распыла капель в КС ЖРД.
3. Рассмотреть уравнения сохранения в форме Лагранжа для капельной (дискретной) фазы в КС ЖРД.
4. Рассмотреть модели испарения распыленных капель в КС ЖРД.

Типовые шкала и критерии оценки результатов рубежной контрольной работы приведены в общей части ФОС программы

2.3. Промежуточная аттестация

Допуск к промежуточной аттестации осуществляется по результатам текущего и рубежного контроля. Условиями допуска являются успешная сдача всех лабораторных работ и положительная интегральная оценка по результатам текущего и рубежного контроля.

Промежуточная аттестация, согласно РПД, проводится в виде экзамена по дисциплине устно по билетам. Билет содержит теоретические вопросы (ТВ) для проверки усвоенных знаний, практические задания (ПЗ) для проверки усвоенных умений и комплексные задания (КЗ) для контроля уровня приобретенных владений всех заявленных компетенций.

Билет формируется таким образом, чтобы в него попали вопросы и практические задания, контролирующие уровень сформированности всех заявленных компетенций. Форма билета представлена в общей части ФОС образовательной программы.

2.3.1. Типовые вопросы и задания для экзамена по дисциплине

Типовые вопросы для контроля усвоенных знаний:

Термодинамические модели

1. Состав и свойства баллистических ТРТ.
2. Состав и свойства смесевых ТРТ.
3. Равновесный состав газов. Константы химического равновесия.
4. Уравнения материального баланса.
5. Система уравнений термодинамического расчета процессов горения и истечения.
6. Компонентный и элементный составы топлива и продуктов сгорания (ПС).
7. Закон сохранения энтальпии. Определение температуры в КС.
8. Закон сохранения энтропии. Определение температуры на срезе сопла.
9. Алгоритм терморасчета горения в КС.
10. Алгоритм терморасчета истечения в сопле.

Модели горения твердых ракетных топлив

1. Физическая модель горения баллистических ТРТ.
2. Физическая модель горения смесевых ТРТ.

3. Математическая модель стационарного газофазного горения ТРТ.
4. Инженерные модели стационарного горения ТРТ.
5. Физическая модель нестационарного горения ТРТ.
6. Математическая модель нестационарного горения ТРТ.
7. Особенности горения ТРТ в режимах переменного давления.

Инженерные модели внутрикамерного процесса

1. Система уравнений нестационарного течения газа вдоль горячей поверхности заряда.
2. Система уравнений установившегося течения газа вдоль горячей поверхности заряда.
3. Инженерная газодинамическая модель течения газа в канале заряда произвольной формы.
4. Инженерная модель течения газа в предсопловом объеме.
5. Инженерная модель горения распыленного топлива.

Численное моделирование внутрикамерного процесса

1. Численная модель внутрикамерного процесса в РДТТ.
2. Модель межфазного взаимодействия в РДТТ.
3. Уравнения движения газа в КС ЖРД в подходе Эйлера.
4. Уравнения движения капель распыленного топлива в КС ЖРД в подходе Лагранжа.
5. Модель межфазного взаимодействия в КС ЖРД.

Типовые вопросы и практические задания для контроля освоенных умений:

1. Указать области применения квазистационарных моделей внутрикамерного процесса.
2. Указать области применения нестационарных моделей внутрикамерного процесса.
3. Имеются ТРТ с показателями в законе горения 0.2 и 0.8. Какое топливо целесообразно выбрать для создания нерегулируемого РДТТ и почему?
4. Объяснить зависимость пустотной тяги РД от начальной температуры заряда.
5. Объяснить зависимость пустотной удельного импульса РД от начальной температуры заряда.
6. Объяснить наличие пороговой скорости ПС при расчетах турбулентного горения ТРТ.
7. Объяснить влияние подогрева топлива на спектр распыла капель в КС ЖРД.
8. Объяснить способ определения элементного состава ТРТ при известном компонентном составе.
9. Определение энтальпии ТРТ по известному компонентному составу.

10. Определение энтальпии жидкого топлива по известному соотношению компонентов.

Типовые комплексные задания для контроля приобретенных владений:

1. Разработать методику расчета параметров однофазных ПС в цилиндрическом канале заряда РДТТ в одномерной постановке, считая известными параметры потока во входном сечении. Составить укрупненный алгоритм, реализующий методику в виде компьютерной программы.

2. Разработать методику расчета параметров однофазных ПС в цилиндрическом канале заряда РДТТ в двумерной постановке, считая известными параметры потока во входном сечении. Составить укрупненный алгоритм, реализующий методику в виде компьютерной программы.

3. Разработать методику расчета параметров двухфазных ПС в цилиндрическом канале заряда РДТТ в одномерной постановке, считая известными параметры потока во входном сечении. Составить укрупненный алгоритм, реализующий методику в виде компьютерной программы.

4. Разработать методику расчета параметров двухфазных ПС в цилиндрическом канале заряда РДТТ в двумерной постановке, считая известными параметры потока во входном сечении. Составить укрупненный алгоритм, реализующий методику в виде компьютерной программы.

5. Разработать методику расчета параметров ПС в ЖРД в стационарной одномерной постановке.

Перечень типовых ситуационных заданий и кейсов для проверки умений и владений представлен в Приложении 1. *Полный перечень теоретических вопросов и практических заданий в форме утвержденного комплекта экзаменационных билетов хранится на выпускающей кафедре.*

2.3.2. Шкалы оценивания результатов обучения на экзамене

Оценка результатов обучения по дисциплине в форме уровня сформированности компонентов *знать, уметь, владеть* заявленных компетенций проводится по 4-балльной шкале оценивания путем выборочного контроля во время экзамена.

Типовые шкала и критерии оценки результатов обучения при сдаче экзамена для компонентов *знать, уметь и владеть* приведены в общей части ФОС образовательной программы.

3. Критерии оценивания уровня сформированности компонентов компетенций

3.1. Оценка уровня сформированности компонентов компетенций

При оценке уровня сформированности компетенций в рамках выборочного контроля при экзаменесчитается, что *полученная оценка за компонент проверяемой в билете компетенции обобщается на соответствующий компонент всех компетенций, формируемых в рамках данной учебной дисциплины.*

Типовые критерии и шкалы оценивания уровня сформированности компонентов дисциплинарных компетенций приведены в общей части ФОС образовательной программы.

3.2. Оценка уровня сформированности компетенций

Общая оценка уровня сформированности всех компетенций проводится путем агрегирования оценок, полученных студентом за каждый компонент формируемых компетенций, с учетом результатов текущего и рубежного контроля в виде интегральной оценки по 4-балльной шкале. Все результаты контроля заносятся в оценочный лист и заполняются преподавателем по итогам промежуточной аттестации.

Форма оценочного листа и требования к его заполнению приведены в общей части ФОС образовательной программы.

При формировании итоговой оценки промежуточной аттестации в виде экзамена используются типовые критерии, приведенные в общей части ФОС образовательной программы.

Типовые ситуационные задания и кейсы для проверки умений и владений

Задание № __. (анализ кейс-стади)

Проверяемые результаты обучения:

Задание. Внимательно прочитайте текст предложенного кейса и ответьте на вопросы задания.

Критерии оценки ситуационных заданий

Оценка «пять» ставится, если обучающийся осознанно излагает и оценивает суть данной ситуации, с аргументацией своей точки зрения, умеет анализировать, обобщать и предлагает верные пути решения складывающейся ситуации.

Оценка «четыре» ставится, если обучающийся понимает суть ситуации, логично строит свой ответ, но допускает незначительные неточности при определении путей решения.

Оценка «три» ставится, если обучающийся ориентируется в сущности складывающейся ситуации, но нуждается в наводящих вопросах, не умеет анализировать и не совсем верно намечает пути решения ситуации.

Оценка «два» ставится, если обучающийся не ориентируется и не понимает суть данной ситуации, не может предложить путей ее решения, либо допускает грубые ошибки.

Ситуация 1. Имеется РДТТ со следующими параметрами:

Тяга в пустоте	100кН
Удельный импульс в пустоте	2500 м/с
Площадь поверхности горения	1.5 м ²
Плотность ТТ	1650 кг/м ³
Единичная скорость горения	0.00075 м/с
Давление в КС	8 МПа

Установить, является ли этот двигатель работоспособным.

Установить тип применяемого ТРТ.

Ситуация 2. Имеется РДТТ со следующими параметрами:

Тяга в пустоте	100кН
Удельный импульс в пустоте	2500 м/с
Площадь поверхности горения	1.5 м ²
Плотность ТТ	1700 кг/м ³
Единичная скорость горения	0.00075 м/с
Давление в КС	10 МПа

Установить, является ли этот двигатель работоспособным.

Установить тип применяемого ТРТ.

Ситуация 3. Имеется РДТТ со следующими параметрами:

Тяга в пустоте	100кН
Удельный импульс в пустоте	2500 м/с
Площадь поверхности горения	1.5 м ²
Плотность ТТ	1800 кг/м ³
Единичная скорость горения	0.00035 м/с
Давление в КС	4 МПа

Установить, является ли этот двигатель работоспособным.

Установить тип применяемого ТРТ.

Ситуация 4. Имеется РДТТ со следующими параметрами:

Тяга в пустоте	100кН
Удельный импульс в пустоте	2500 м/с
Площадь поверхности горения	1.5 м ²
Плотность ТТ	1850 кг/м ³
Единичная скорость горения	0.00035 м/с
Давление в КС	8 МПа

Установить, является ли этот двигатель работоспособным.

Установить тип применяемого ТРТ.

Ситуация 5. Имеется РДТТ со следующими параметрами:

Тяга в пустоте	100кН
Удельный импульс в пустоте	2500 м/с
Площадь поверхности горения	1.5 м ²
Плотность ТТ	1900 кг/м ³
Единичная скорость горения	0.00075 м/с
Давление в КС	12 МПа

Установить, является ли этот двигатель работоспособным.

Установить тип применяемого ТРТ.

Типовые контрольные задания для оценки результатов обучения по дисциплине, формирующих дисциплинарные части компетенций

Вопросы для контроля усвоенных знаний:

а) перечень вопросов для оценивания компетенции ПК-1.5:

1. Рассмотреть систему уравнений ламинарного течения ПС в КС РДТТ.
2. Рассмотреть систему уравнений турбулентного течения ПС в КС РДТТ.
3. Рассмотреть систему уравнений нестационарного течения двухфазных ПС в канале заряда РДТТ.
4. Рассмотреть систему уравнений нестационарного течения двухфазных ПС в дозвуковой части сопла.
5. Рассмотреть газодинамическую модель определения параметров ПС вдоль горячей поверхности заряда.
6. Рассмотреть газодинамическую модель определения параметров ПС в дозвуковой части сопла.

б) перечень вопросов для оценивания компетенции ПК-2.8:

1. Дать описание численного метода расчета газодинамических параметров рабочего процесса в КС РДТТ
2. Дать описание аналитического метода расчета газодинамических параметров рабочего процесса в КС РДТТ.
3. Объяснить принципы построения и совершенствования моделей течения ПС в канале заряда РДТТ.
4. Объяснить принципы построения и совершенствования моделей течения ПС в дозвуковой части сопла.

Задания для контроля усвоенных умений:

а) перечень вопросов для оценивания компетенции ПК-1.5:

1. Определить максимально возможный диапазон регулирования тяги РДТТ с постоянной поверхностью горения заряда, если диапазон устойчивого горения по давлению составляет от 2 МПа до 20 МПа.
2. Определить, на сколько изменится давление в КС РДТТ при уменьшении диаметра критического сечения в 2 раза. Зависимостью состава и свойств ПС от давления пренебречь.
3. Как и во сколько раз изменится тяга и удельный импульс РДТТ при изменении начальной температуры заряда от $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$.
4. Определить скорость горения ТТ при следующих известных параметрах:
 - площадь критического сечения сопла const;
 - поверхность горения заряда const;
 - тяга;
 - удельный импульс;
 - плотность топлива

5. Определить внутренний диаметр КС РДТТ с одношашечным зарядом при следующих известных параметрах:

- диаметр внутреннего канала заряда;
- скорость горения ТТ;
- полное время работы двигателя.

б) перечень вопросов для оценивания компетенции ПК-2.8:

1. Вывести зависимость для соотношения расходов ПС при изменении начальной температуры заряда от 263К до 288К.

2. Как и за счет чего изменяются тяга и удельный импульс при увеличении начальной температуры заряда ТТ?

3. Разработать методику расчета параметров течения ПС в цилиндрическом канале заряда. Составить укрупненный алгоритм, реализующий методику в виде компьютерной программы.

4. Разработать методику расчета параметров течения ПС в каналах нецилиндрической формы. Составить укрупненный алгоритм, реализующий методику в виде компьютерной программы.

5. Разработать методику расчета межфазного взаимодействия в КС ЖРД.

Задания для контроля усвоенных владений:

а) перечень вопросов для оценивания компетенции ПК-1.5:

1. Определить изменение скорости движения ПС в цилиндрическом канале заряда при следующих известных параметрах:

- диаметр канала 360 мм;
- давление у переднего торца заряда 3.92 МПа;
- плотность топлива 1600 кг/м³;
- работоспособность топлива 981 кДж/кг.

2. Определить диаметр критического сечения сопла при следующих известных параметрах:

- тяга в пустоте;
- удельный импульс в пустоте;
- давление в КС;
- работоспособность топлива;
- показатель адиабаты ПС.

3. Определить тягу двигателя на расчетном режиме работы сопла при следующих известных параметрах:

- скорость истечения;
- поверхность горения заряда;
- скорость горения топлива;
- плотность топлива

4. Определить скорость горения ТТ при следующих известных параметрах:

- давление в КС;
- температура в КС;
- площадь поверхности горения;

- плотность топлива;
- площадь критического сечения сопла.

5. Определить максимальное давление в КС РДТТ при следующих известных параметрах:

- стандартный закон горения топлива;
- площадь поверхности горения заряда;
- коэффициент истечения;
- диаметр критического сечения сопла;
- начальная температура заряда;
- температурный коэффициент горения.

б) перечень вопросов для оценивания компетенции ПК-2.8:

1. При запуске на уровне моря РДТТ работает на расчетном режиме. Во сколько раз должна увеличиться (уменьшиться) площадь горячей поверхности заряда, чтобы при давлении окружающей среды 0.01 МПа сопло работало на расчетном режиме?

2. В чем заключается физический смысл возможности существования оптимального давления в КС РДТТ?

3. По расчету оптимальное давление в КС РДТТ равно 2.0 МПа. Нижнему пределу устойчивого горения ТТ соответствует давление 2.5 МПа. Каким нужно выбрать давление в КС РДТТ?

4. Составить систему уравнений и граничные условия при движении ПС вдоль горячей поверхности заряда.

5. Составить систему уравнений и граничные условия при движении ПС в канале заряда переменного сечения.

6. Составить систему уравнений и граничные условия при движении ПС в нецилиндрических каналах зарядов.

7. Составить систему уравнений и граничные условия при движении ПС в дозвуковой части сопла.