

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»

УТВЕРЖДАЮ

Декан ФМАТ  Ряжских В.И.
«31» августа 2021 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА
дисциплины
«Теория и расчет жидкостных ракетных двигателей»

Специальность 24.05.02 Проектирование авиационных и ракетных двигателей

Специализация Проектирование жидкостных ракетных двигателей

Квалификация выпускника инженер

Нормативный период обучения 5 лет и 6 м.

Форма обучения очная

Год начала подготовки 2021

Авторы программы



/ А.В. Кретинин /



/ Т.А. Башарина /

Заведующий кафедрой
Ракетных двигателей



/ В.С. Рачук /

Руководитель ОПОП



/ В.С. Рачук /

Воронеж 2021

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

1.1. Цели дисциплины – освоение студентами основ теории, устройства ЖРД, основ проектирования, освоении инженерных методик расчета узлов и агрегатов ЖРД.

1.2. Задачи освоения дисциплины - формирование знаний, умений и навыков в следующих направлениях: основные процессы, протекающие в двигателе; влияние различных параметров на параметры двигателя и его агрегатов; тенденции развития ракето- и двигателестроения; термогазодинамические процессы и явления в агрегатах ЖРД; методики инженерных расчетов, применяемых при проектировании агрегатов ЖРД; выбор принципиальной и расчет основных параметров пневмогидравлической схемы и системы питания; основы общей теории лопаточных машин; возможности использования современных вычислительных технологий при решении прикладных задач.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОПОП

Дисциплина «Теория и расчет жидкостных ракетных двигателей» относится к дисциплинам части, формируемой участниками образовательных отношений блока Б1.

3. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Процесс изучения дисциплины «Теория и расчет жидкостных ракетных двигателей» направлен на формирование следующих компетенций:

ПК-1: способность проводить расчёты прочности, надежности и рабочих процессов в двигателях и энергетических установках летательных аппаратов

ПК-2: способность проводить научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по двигателям и энергетическим установкам летательных аппаратов и их составным частям

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции
ПК-1	<p>Знать принципиальные схемы двигательных и энергоустановок ЛА; параметры рабочего процесса ЖРД различных схем; рабочий процесс и характеристики систем питания и регулирования ЖРД; методы расчета и проектирования систем подачи ЖРД</p> <p>Уметь применять методы анализа ЖРД различных схем; использовать методы расчета систем подачи</p>

	двигательных и энергетических установок; использовать методы расчета рабочих процессов в ЖРД; использовать методы пневмогидравлического расчета
	Владеть способностью выполнять расчеты рабочих процессов, статических и динамических характеристик ЖРД, их узлов и элементов
ПК-2	Знать основы разработки и проектирования ЖРД как сложных технических систем
	Уметь применять методы составления программ компьютерных расчетов двигательных и энергетических установок ЛА на базе типовых или авторских математических моделей
	Владеть навыками проведения аналитических расчетов и с применением программных комплексов, реализующих термодинамический расчет, расчет охлаждения, газодинамическое профилирование, термо-прочностные и другие проектные расчеты ЖРД; осуществлять конструирование деталей, узлов и элементов ЖРД

4. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ

Общая трудоемкость дисциплины «Теория и расчет жидкостных ракетных двигателей» составляет 9 з.е.

Распределение трудоемкости дисциплины по видам занятий
очная форма обучения

Виды учебной работы	Всего часов	Семестры	
		6	7
Аудиторные занятия (всего)	162	108	54
В том числе:			
Лекции	54	36	18
Практические занятия (ПЗ), в том числе в форме практической подготовки	54	36(18)	18(10)
Лабораторные работы (ЛР)	54	36	18
Самостоятельная работа	90	36	54
Курсовой проект	+		+
Часы на контроль	72	36	36
Виды промежуточной аттестации - экзамен	+	экзамен	экзамен
Общая трудоемкость: академические часы	324	180	144
зач.ед.	9	5	4

5. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

5.1 Содержание разделов дисциплины и распределение трудоемкости по видам занятий

очная форма обучения

№ п/п	Наименование темы	Содержание раздела	Лекц	Прак зан.	Лаб. зан.	СРС	Всего, час
1	Основы теории и устройства ЖРД	<p>Общие сведения о ракетных двигателях. Терминология и специфические особенности РД. Классификация и основы устройства ЖРД. Основные параметры, характеризующие ЖРД. Области применения ЖРД. Краткий обзор развития ЖРД. Общие сведения о рабочих телах ЖРД как о термодинамической системе. Уравнения состояния рабочих тел. Явления переноса и диссипации энергии в условиях ЖРД. Общая форма сохранения энергии. Механическая форма уравнения сохранения энергии. Уравнения неразрывности потока ПС. Уравнение изменения количества движения. Уравнение параметров торможения. Ускорение ПС. О форме сверхзвукового сопла. Тяга ЖРД. Общие сведения. Определение тяги как равнодействующей сил давления. Анализ формулы тяги. Удельный импульс. Основные составляющие тяги и место их приложения. Тяга и удельный импульс ЖРД без дожига. Расчет тяги и удельного импульса с использованием газодинамических функций. Характеристики ЖРД. Общие сведения. Дроссельная характеристика. Высотная характеристика. Управление вектором тяги. Топлива ЖРД. Основные сведения о топливах и их физико-химических характеристиках. Требования к топливам. Энергетические характеристики топлива.</p> <p>Практическая подготовка: Расчет тяги и удельного импульса с использованием газодинамических функций.</p>	6	4	6	10	28
2	Расчет и согласование основных параметров схемы двигателя	<p>Проектирование структурной схемы ЖРД. Выбор рода ГГ и приблизительного давления в нем. Характер выхлопа отработанного газа из турбины. Схема регулирования тяги и соотношения компонентов. Общая схема охлаждения (охлаждающий компонент, схему подвода охладителя к камере, наличие поясов завесы). Наддув баков. Система управления вектором тяги. Расчет и согласование основных параметров схемы ЖРД. Предварительное распределение соотношения компонентов по се-</p>	6	4	6	10	28

		<p>чениям КС, в предположении двухслойной модели ($K_{мст}$, $K_{мя}$). Определение среднего соотношения компонентов по камере. Расчет распределения давлений по трактам двигателя и определение требуемого давления подачи. Выбор температуры в ГГ и соответствующих ей параметров ($K_{мгг}$, $\mu_{гг}$, $C_{гг}$, $\rho_{гг}$). Условие замыкания схемы, определение относительного перепада давления на турбине и вычисление давления в ГГ. При схеме без дожигания нахождение относительного расхода газогенераторного газа на турбину и расчет коэффициента, учитывающего потери импульса на привод ТНА ($\phi_{ТНА}$).</p> <p>Практическая подготовка: Расчет и согласование основных параметров схемы ЖРД.</p>					
3	Термодинамический расчет	<p>Основы расчетов термохимических свойств топлива. Расчеты по составу компонентов. Энтальпия топлива. Системы отсчета полных энтальпий. Вычисление полной энтальпии по теплотам реакций. Расчет сгорания и истечения топлива. Понятие о равновесном составе газов. Уравнения химического равновесия. Константы химического равновесия. Понятие о гетерогенном составе смеси. Вычисления по константам равновесия. Уравнения сохранения вещества при химических реакциях. Система уравнений для расчета равновесного состава продуктов сгорания при заданной температуре и давлении. Расчет теоретической температуры и равновесного состава ПС в сопле камеры ЖРД при изоэнтропическом течении. Расчет теоретических параметров истечения. Особенности истечения ПС с конденсированной фазой.</p> <p>Практическая подготовка: Расчет теоретической температуры и равновесного состава ПС в сопле камеры ЖРД при изоэнтропическом течении. Расчет теоретических параметров истечения.</p>	6	4	6	10	28
4	Расчет системы смесеобразования	<p>Процессы в камере ЖРД. Теория и расчет однокомпонентных центробежных форсунок без учета вязкости компонентов топлива. Расчет с учетом вязкости. Расчет двухкомпонентных форсунок с внешним и внутренним смешением компонентов топлива. Влияние конструктивных факторов на гидравлику центробежных форсунок. Проектирование смесительной головки. Распыливание топлива. Смещение компонентов топлива. Испарение топлива. Воспламенение топлива. Расчет и выбор объема камеры сгорания. Расчет и выбор безразмерной площади</p>	8	4	8	12	36

		камеры сгорания.					
		Практическая подготовка: Расчет однокомпонентных центробежных форсунок. Расчет двухкомпонентных форсунок с внешним и внутренним смешением компонентов топлива. Проектирование смесительной головки.		4			
5	Расчет наружного охлаждения	Основы теории теплообмена в камере ЖРД. Особенности конвективного теплообмена в условиях камеры ЖРД. Уравнения пограничного слоя. Метод решения интегральных соотношений пограничного слоя. Расчетные соотношения для конвективного теплового потока и трения в камере ЖРД. Лучистый теплообмен в камере ЖРД. Теплозащита стенок камеры ЖРД. Особенности и схемы теплозащиты стенок камеры ЖРД. Физические основы различных схем теплозащиты. Основные особенности и требования, предъявляемые к наружному охлаждению. Теплоотдача шероховатой поверхности стенки в охлаждающую жидкость. Интенсификация наружного проточного охлаждения. Особенности расчета тепловых потоков в стенку при завесном охлаждении.	8	6	8	12	36
		Практическая подготовка: Расчет наружного охлаждения.		2			
6	Газодинамическое профилирование	Движение газа без скачков уплотнения Одномерные течения идеального газа. Различные формы уравнения Бернулли для адиабатического течения идеального газа. Энтальпия газового потока. Скорость распространения звука и число Маха. Закономерность изменения параметров газа вдоль струйки. Уравнение Гюгонио. Условие непрерывного перехода через звуковое значение скорости. Критическая, максимальная скорости и параметры торможения. Безразмерные скорости газа. Основные газодинамические функции, их графическое представление и использование в таблицах. Истечение газа через сужающее сопло. Формула Сан-Венана-Венцеля. Закономерность изменения весового расхода газа. Критическое отношение давлений. Сопло Лаваля и режимы его работы. Одномерное течение газа с трением. Сопла ЖРД. Оценка совершенства, потери и схемы сопел ЖРД. Анализ и оценка потерь в соплах. Основы профилирования сопел Лаваля. Основы построения коротких профилированных сопел. Построение газодинамического профиля камеры ЖРД. Расчет основных размеров камеры двигателя: диаметра критического сечения, вы-	8	6	8	12	36

		ходного сечения, радиуса цилиндрической части камеры сгорания, радиусов контура входной части и ее длины, координат точек сопряжения и т.д. Расчет контура сверхзвуковой части сопла. Алгоритмы расчета. Численная реализация.					
		Практическая подготовка: Расчет основных размеров камеры двигателя: диаметра критического сечения, выходного сечения, радиуса цилиндрической части камеры сгорания, радиусов контура входной части и ее длины, координат точек сопряжения и т.д. Расчет контура сверхзвуковой части сопла.		2			
7	Неустойчивость рабочего процесса в ЖРД	Неустойчивость рабочего процесса ЖРД. Классификация неустойчивых режимов. Качественный механизм возникновения колебаний давления в КС. Процесс выгорания топлива в КС и его характеристика. Время преобразования. Физическая картина возникновения НЧ колебаний. Особенности ВЧ колебаний и акустика КС. Физическая картина возникновения ВЧ колебаний.	6	4	6	12	30
		Практическая подготовка: Изучение и анализ физической картины возникновения ВЧ колебаний.		2			
8	Математическое моделирование рабочих процессов в ЖРД	Одномерная математическая модель процесса горения в камере ЖРД. Задачи термодинамического расчета. Основы расчета термохимических свойств топлива. Система уравнений для выполнения расчета. Численный метод решения системы химического равновесия. Метод расчета равновесного состава и температуры в камере сгорания, выходном и критическом сечениях сопла. Определение теоретических параметров истечения. Расчет наружного охлаждения ЖРД. Расчет конвективных тепловых потоков. Расчет лучистого теплового потока. Расчет размывания завесы. Расчет радиационного охлаждения. Поверочный расчет наружного охлаждения. Теплоотдача оребренной стенки. Стандартный порядок расчета наружного охлаждения. Алгоритм расчета на ЭВМ. Инженерная методика расчета гидравлических потерь в тракте охлаждения.	6	4	6	12	30
		Практическая подготовка: Расчет конвективных тепловых потоков. Расчет лучистого теплового потока. Расчет радиационного охлаждения.		2			
Итого			54	54	54	90	252

Практическая подготовка при освоении дисциплины проводится путем непосредственного выполнения обучающимися отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью, способствующих формированию, закреплению и развитию практических навыков и компетенций по профилю соответствующей образовательной программы на практических занятиях:

№ п/п	Перечень выполняемых обучающимися отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью	Формируемые профессиональные компетенции
1	Проведение гидравлических, газодинамических, термодинамических и прочностных расчетов двигательных установок ЖРД и их составных частей (П 25.054, D/03.7).	ПК-1
2	Систематизация и анализ конструктивных и схемных решений ЖРД и их составных частей (П 25.054, C/01.7)	ПК-2
3	Выполнение проектирования перспективных ЖРД как сложных технических систем в рамках научно-исследовательской части курсовой работы (П 25.054, C/02.7)	ПК-2
4	Организация теоретических и экспериментальных исследований в области создания новых образцов ЖРД, выполняемых совместно с научно-исследовательскими организациями ракетно-космической промышленности (П 25.054, C/04.7)	ПК-2

5.2 Перечень лабораторных работ

1. Изучение ПГС ЖРД, мощностной баланс.
2. Определение характеристики факела распыла форсунок.
3. Освоение методики пересчета с модельных испытаний на натурные.
4. Освоение работы в программе термодинамического расчета.
5. Освоение работы в программе расчета наружного охлаждения.
6. Освоение методов расчета теплообмена в системах охлаждения ЖРД.

7. Освоение методов сверхзвукового профилирования сопла Лавалья.
8. Защита лабораторных работ. Контроль знаний.

6. ПРИМЕРНАЯ ТЕМАТИКА КУРСОВЫХ ПРОЕКТОВ (РАБОТ) И КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

В соответствии с учебным планом освоение дисциплины предусматривает выполнение курсового проекта в 7 семестре для очной формы обучения.

Примерная тематика курсового проекта: «Проектирование камеры ЖРД»

Задачи, решаемые при выполнении курсового проекта:

1. Выбор прототипа проектируемого двигателя. Предварительная проработка схемы ДУ и описание ее работы на установившемся режиме.

2. Условная оптимизация соотношения компонентов по пустотному удельному импульсу. Расчет стехиометрического соотношения компонентов. Подготовка данных. Расчет и построение графиков в зависимости от α и K_T при разных допущениях о равновесности процесса.

3. Проектирование проточной части сопла. Сопло с конической сверхзвуковой частью с оптимальным углом раскрытия. Сопло с профилированной сверхзвуковой частью.

4. Расчет основных параметров двигателя и размеров камеры двигателя с учетом потерь.

5. Расчет и построение характеристик камеры. Дроссельные характеристики. Характеристика единичной камеры. Характеристика ДУ при поочередном дросселировании. Высотные характеристики. Высотные характеристики в функции от p_h . Высотные характеристики в функции от высоты (глубины).

6. Подготовка данных. расчет и построение распределения параметров p , T , r , M , l , W , rW и массовых концентраций основных составляющих рабочего тела по длине сопла.

7. Научно-исследовательская часть проекта: Математическое моделирование предельного влияния скорости химических реакций в рабочем теле. Расчет и построение распределения параметров рабочего тела p , T , r , W , rW по длине профилированного сопла при различных допущениях о скоростях химических реакций в потоке. Равновесная модель течения. Неравновесная модель течения: а) Равновесная модель течения на дозвуковом и не равновесная модель (замороженное течение) на сверхзвуковом участках сопла; б) Неравновесная модель (замороженное течение) на всем протяжении проточной части камеры. Анализ особенностей распределения параметров по длине проточной части камеры при разных моделях течения и объяснение причин их появления с учетом изменения состава рабочего тела. Оценка возможных потерь на неравновесность течения в сопле двигателя

Курсовой проект включает в себя графическую часть и расчетно-пояснительную записку.

7. ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

7.1. Описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования, описание шкал оценивания

7.1.1 Этап текущего контроля

Результаты текущего контроля знаний и межсессионной аттестации оцениваются по следующей системе:

«аттестован»;

«не аттестован».

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции	Критерии оценивания	Аттестован	Не аттестован
ПК-1	Знать принципиальные схемы двигательных и энергоустановок ЛА; параметры рабочего процесса ЖРД различных схем; рабочий процесс и характеристики систем питания и регулирования ЖРД; методы расчета и проектирования систем подачи ЖРД	Активная работа на практических занятиях, отвечает на теоретические вопросы при защите курсового проекта	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	Уметь применять методы анализа ЖРД различных схем; использовать методы расчета систем подачи двигательных и энергетических установок; использовать методы расчета рабочих процессов в ЖРД; использовать методы пневмогидравлического расчета	Решение стандартных практических задач, написание курсового проекта	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	Владеть способностью выполнять расчеты рабочих процессов, статических и динамических характеристик ЖРД, их узлов и элементов	Решение прикладных задач в конкретной предметной области, выполнение плана работ по разработке курсового проекта	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
ПК-2	Знать основы проектирования ЖРД как сложных технических систем	Активная работа на практических занятиях, отвечает на теоретические вопросы при защите курсового проекта	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	Уметь применять методы составления	Решение стандарт-	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабо-	Невыполнение работ в срок,

	программ компьютерных расчетов двигательных и энергетических установок ЛА на базе типовых или авторских математических моделей	ных практических задач, написание курсового проекта	чих программах	предусмотренный в рабочих программах
	Владеть навыками проведения аналитических расчетов и с применением программных комплексов, реализующих термодинамический расчет, расчет охлаждения, газодинамическое профилирование, термо-прочностные и другие проектные расчеты ЖРД; осуществлять конструирование деталей, узлов и элементов ЖРД	Решение прикладных задач в конкретной предметной области, выполнение плана работ по разработке курсового проекта	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах

7.1.2 Этап промежуточного контроля знаний

Результаты промежуточного контроля знаний оцениваются в 6, 7 семестре для очной формы обучения по четырехбалльной системе:

«отлично»;

«хорошо»;

«удовлетворительно»;

«неудовлетворительно».

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции	Критерии оценивания	Отлично	Хорошо	Удовл.	Неудовл.
ПК-1	Знать принципиальные схемы двигательных и энергоустановок ЛА; параметры рабочего процесса ЖРД различных схем; рабочий процесс и характеристики систем питания и регулирования ЖРД; методы расчета и проектирования систем подачи ЖРД	Тест	Выполнение теста на 90- 100%	Выполнение теста на 80- 90%	Выполнение теста на 70- 80%	В тесте менее 70% правильных ответов
	Уметь применять методы анализа ЖРД различных схем; использовать методы расчета систем подачи двигательных и энергетических установок; использовать методы расчета рабочих процессов в ЖРД; использовать методы	Решение стандартных практических задач	Задачи решены в полном объеме и получены верные ответы	Продемонстрирован верный ход решения всех, но не получен верный ответ во всех задачах	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены

	пневмогидравлического расчета					
	Владеть способностью выполнять расчеты рабочих процессов, статических и динамических характеристик ЖРД, их узлов и элементов	Решение прикладных задач в конкретной предметной области	Задачи решены в полном объеме и получены верные ответы	Продемонстрирован верный ход решения всех, но не получен верный ответ во всех задачах	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены
ПК-2	Знать основы проектирования ЖРД как сложных технических систем	Тест	Выполнение теста на 90-100%	Выполнение теста на 80-90%	Выполнение теста на 70-80%	В тесте менее 70% правильных ответов
	Уметь применять методы составления программ компьютерных расчетов двигательных и энергетических установок ЛА на базе типовых или авторских математических моделей	Решение стандартных практических задач	Задачи решены в полном объеме и получены верные ответы	Продемонстрирован верный ход решения всех, но не получен верный ответ во всех задачах	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены
	Владеть навыками проведения аналитических расчетов и с применением программных комплексов, реализующих термодинамический расчет, расчет охлаждения, газодинамическое профилирование, термопрочностные и другие проектные расчеты ЖРД; осуществлять конструирование деталей, узлов и элементов ЖРД	Решение прикладных задач в конкретной предметной области	Задачи решены в полном объеме и получены верные ответы	Продемонстрирован верный ход решения всех, но не получен верный ответ во всех задачах	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены

7.2 Примерный перечень оценочных средств (типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности)

7.2.1 Примерный перечень заданий для подготовки к тестированию

1. Тяга ЖРД $P=30$ КН, удельный импульс $I_y=3000$ м/с. Чему равен массовый расход через этот ЖРД?

1. 1 кг/с
2. 10 кг/с
3. 100 кг/с

2. Главная составляющая тяги определяется как:

1. произведение массового расхода на удельный импульс
2. произведение массового расхода на эффективную скорость истечения
3. произведение давления в камере на площадь критического сечения

3. Режим работы камеры с недорасширением возникает, когда:

1. давление на срезе сопла больше давления окружающей среды
2. давление на срезе сопла равно нулю
3. давление на срезе сопла меньше давления окружающей среды

4. Коэффициент тяги камеры – это

1. отношение тяги камеры к соотношению компонентов топлива
2. отношение тяги камеры к удельному импульсу
3. отношение внутренней тяги камеры к ее главной составляющей

5. Коэффициент потерь на привод ТНА учитывает:

1. потери удельного импульса тяги, связанные с выбросом отработанного генераторного газа в окружающую среду
2. потери удельного импульса тяги, вызванные трением лопаток турбины и торцовых уплотнений
3. потери из-за неадиабатичности процесса расширения газа на турбине

6. В двигателе без дожигания:

1. удельный импульс камеры больше удельного импульса ЖРД
2. удельный импульс камеры равен удельному импульсу ЖРД
3. удельный импульс камеры меньше удельного импульса ЖРД

7. Наступление баланса мощности турбины и насосов называется:

1. условием оптимальной тяги
2. условием замыкания схемы
3. условием максимального КПД

8. Кривая располагаемой мощности турбины - это:

1. зависимость мощности турбины от соотношения компонентов
2. зависимость мощности турбины от расхода генераторного газа
3. зависимость мощности турбины от относительного перепада давления газа на турбине

9. Для двигателя с восстановительным газогенератором по отношению к ЖРД с окислительным газогенератором

1. $(RT)_{вос} > (RT)_{ок}$
2. $(RT)_{вос} = (RT)_{ок}$

3. $(RT)_{\text{вос}} < (RT)_{\text{ок}}$

10. Коэффициент избытка окислителя это

1. отношение массового расхода окислителя к массовому расходу горючего
2. отношение расхода окислителя через камеру к расходу окислителя через газогенератор
3. отношение соотношения компонентов топлива к стехиометрическому соотношению компонентов

11. В каком сечении максимальная температура по длине камеры ЖРД?

1. в камере сгорания
2. в критическом сечении сопла
3. на срезе сопла

12. В каком сечении максимальное давление по длине камеры ЖРД?

1. в камере сгорания
2. в критическом сечении сопла
3. на срезе сопла

13. В каком сечении максимальная скорость по длине камеры ЖРД?

1. в камере сгорания
2. в критическом сечении сопла
3. на срезе сопла

14. Что такое удельная масса ЖРД?

1. отношение массы ЖРД к его удельному импульсу
2. отношение массы ЖРД к массовому расходу
3. отношение массы ЖРД к его тяге

15. Что такое геометрическая степень расширения сопла?

1. отношение площади среза сопла к площади критического сечения сопла
2. отношение площади среза сопла к площади камеры сгорания
3. отношение площади критического сечения сопла к площади среза

16. В каком случае удельный импульс равен скорости истечения продуктов сгорания на срезе сопла?

1. давление на срезе сопла меньше давления окружающей среды
2. давление на срезе сопла равно давлению окружающей среды
3. давление на срезе сопла больше давления окружающей среды
4. всегда

17. Какое топливо в настоящее время энергетически наиболее совершенно?

1. кислород-керосин
2. кислород-водород
3. фтор-водород
4. азотный тетроксид-НДМГ

18. Почему называется "окислительная" схема ЖРД?

1. камера охлаждается окислителем
2. камера работает при коэффициенте избытка окислителя большем единицы
3. газогенератор работает при коэффициенте избытка окислителя большем единицы

19. На двигателе, какой ступени при одинаковых давлениях в камере сгорания и тяге площадь среза сопла больше?

1. первой
2. второй
3. третьей
4. не зависит от ступени

20. Что больше: эффективная скорость истечения или характеристическая скорость

1. эффективная скорость истечения
2. характеристическая скорость
3. равны между собой

21. Сколько уравнений содержит система термодинамического расчета, если топливо состоит из трех химических элементов - Н, С и О ?

1. девять
2. десять
3. одиннадцать

22. Какова размерность коэффициента избытка окислителя?

1. кг ок./кг гор.
2. моль ок./моль гор.
3. безразмерная величина

23. Что такое химическое равновесие?

1. энергия колебательного движения молекул соответствует температуре и давлению
2. энтропия смеси минимальна
3. состав продуктов сгорания успевает отслеживать изменение температуры и давления

24. Какие результаты мы ищем при решении системы химического равновесия?

1. состав смеси и температуру
2. удельный импульс и характеристическую скорость
3. коэффициент тяги и расходный комплекс

25. Чем ограничивается величина давления в камере сгорания для схем с дожиганием?

1. величиной давления окружающей среды
2. соотношением компонентов в камере сгорания
3. располагаемой мощностью турбины

26. Что определяет в реактивном движении формула Циолковского?

1. тягу ракетного двигателя
2. скорость движения ракеты
3. ускорение движения ракеты
4. распределение массы по ступеням ракеты

27. Что понимается под "автономностью" работы ракетного двигателя?

1. независимость параметров от внешней среды
2. рабочее тело двигателя находится на борту летательного аппарата
3. источник энергии находится на борту летательного аппарата
4. двигатель работает без использования внешней среды

28. Укажите характерные значения удельного импульса ЖРД

1. 2200-2500 м/с
2. 3500-4500 м/с

3. 8000-10000 м/с
4. 50000-100000 м/с

29. Какое давление в КС характерно для ЖРД с турбонасосной подачей компонентов топлива без дожигания?

1. 10-30 ат
2. 50-100 ат
3. 150-200 ат
4. 250-350 ат

30. Какова мощность кислородно-водородного ЖРД на расчетном режиме при тяге $P=1$ МН и удельном импульсе $I_y=4400$ м/с

1. 1800 МВт
2. 1500 МВт
3. 2200 МВт
4. 900 МВт

7.2.2 Примерный перечень заданий для решения стандартных задач

Задача №1. Двигатель развивает тягу 1000 кг при секундном расходе топлива в камеру сгорания 4,86 кг. Определить удельный расход топлива в двигателе.

Решение.

- 1) удельная тяга двигателя

$$P_{уд} = \frac{P}{G_S} = \frac{1000}{4,86} = 206 \frac{\text{кг тяги}}{\text{кг топлива/сек}};$$

- 2) удельная тяга двигателя

$$C_{уд} = \frac{1}{P_{уд}} = \frac{1}{206} = 0,00485 \frac{\text{кг топлива/сек}}{\text{кг тяги}} = 4,85 \frac{\text{кг топлива/сек}}{\text{т тяги}}.$$

Задача №2. Написать для керосина условную химическую формулу, если весовые доли его элементов следующие: $C_r = 86,4\%$ и $H_r = 13,6\%$.

Решение.

1. Числа атомов отдельных элементов керосина заданного состава будут

$$c_1 = \frac{C_r}{12} = \frac{86,4}{12} = 7,2 \quad \text{и} \quad h_1 = \frac{H_r}{1} = 13,6.$$

2. Керосин имеет условную химическую формулу $C_{7,2}H_{13,6}$.

Задача №3. Определить элементарный весовой состав горючего, состоящего по весу из 50% триэтиламина ($C_6H_{15}N$) и 50% ксилидина ($C_8H_{11}N$).

Решение.

1. Молекулярные веса компонентов горючего:

а) триэтиламина

$$\mu_{r_1} = 12c_1 + h_1 + 14n_1 = 12 * 6 + 1 * 15 + 14 * 1 = 101,0;$$

б) ксилидина

$$\mu_{r_2} = 12 * 8 + 11 * 1 + 14 * 1 = 121,25;$$

2. Весовые доли элементов компонентов смеси горючего:

$$C_{r_1} = \frac{12c_1}{\mu_{r_1}} = \frac{12 * 6}{101,2} = 0,7115 \text{ кг} = 71,15 \text{ \%};$$

$$H_{r_1} = \frac{h_1}{\mu_{r_1}} = \frac{15}{101,2} = 0,1482 \text{ кг} = 14,82 \text{ \%};$$

$$N_{r_1} = \frac{14n_1}{\mu_{r_1}} = \frac{14 * 1}{101,2} = 0,1403 \text{ кг} = 14,03 \text{ \%};$$

Всего 1 кг или 100 %

б) ксилидина

$$C_{r_2} = \frac{12c_1}{\mu_{r_2}} = \frac{12,8}{121,25} = 0,7939 \text{ кг} = 79,39 \text{ \%};$$

$$H_{r_2} = \frac{h_1}{\mu_{r_2}} = \frac{11}{121,25} = 0,0907 \text{ кг} = 9,07 \text{ \%};$$

$$N_{r_2} = \frac{14n_1}{\mu_{r_2}} = \frac{14}{121,25} = 0,1154 \text{ кг} = 11,54 \text{ \%};$$

Всего 1 кг или 100 %

3. Весовые доли элементов смеси горючего:

$$C_r = g_1C_{r_1} + g_2C_{r_2} = 0,5 + 0,7115 + 0,5 * 0,7939 = 0,7527 \text{ кг};$$

$$H_r = g_1H_{r_1} + g_2H_{r_2} = 0,5 + 0,1482 + 0,5 * 0,0907 = 0,1194 \text{ кг};$$

$$N_r = g_1N_{r_1} + g_2N_{r_2} = 0,5 + 0,1403 + 0,5 * 0,1154 = 0,1279 \text{ кг}.$$

Всего 1 кг

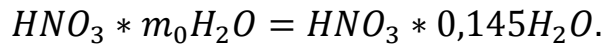
Задача №4. Написать условную химическую формулу для азотной кислоты 96%-ной весовой концентрации и определить весовые доли ее элементов.

Решение.

1. В водном растворе азотной кислоты содержится воды:

$$m_0 = \mu_0 \frac{(100 - \sigma_0)}{18\sigma_0} = 63 \frac{(100 - 96)}{18,96} = 0,145 \text{ моля/моль.}$$

2. Условная химическая формула данного водного раствора азотной кислоты имеет вид



3. Вес водного раствора по расчету 1 моль чистой азотной кислоты:

$$\mu'_0 = \mu_0 \frac{100}{\sigma_0} = 63 \frac{100}{96} = 67,7 \text{ кг.}$$

4. Весовые доли элементов компонентов смеси окислителя:

а) азотной кислоты

$$H_{O_1} = \frac{1}{63} = 0,016 \frac{\text{кг}}{\text{кг}}; \quad N_{O_1} = \frac{14 * 1}{63} = 0,222 \text{ кг};$$

$$O_{O_1} = \frac{16 * 3}{63} = 0,762 \frac{\text{кг}}{\text{кг}};$$

всего

$$H_{O_1} + N_{O_1} + O_{O_1} = 0,016 + 0,762 + 0,222 = 1 \text{ кг};$$

б) воды

$$H_{O_2} = \frac{1}{18} = 0,111 \frac{\text{кг}}{\text{кг}} \text{ и } O_{O_2} = \frac{16,1}{18} = 0,889 \frac{\text{кг}}{\text{кг}};$$

всего

$$H_{O_2} + O_{O_2} = 0,111 + 0,889 = 1 \text{ кг.}$$

5. Весовые доли элементов смеси окислителя:

$$H_O = g_1 H_{O_1} + g_2 H_{O_2} = 0,96 + 0,016 + 0,04 * 0,111 = 0,020 \frac{\text{кг}}{\text{кг}};$$

$$N_O = 0,096 * 0,762 = 0,213 \frac{\text{кг}}{\text{кг}};$$

$$O_O = 0,96 * 0,222 + 0,04 * 0,889 = 0,763 \frac{\text{кг}}{\text{кг}}$$

Всего 1 кг или 100 %

Задача №5. Определить теоретический расход тетранитрометана $C(NO_2)_4$ для полного сгорания 1 кмоль и 1 кг керосина следующего состава: $C_r = 86,4 \%$ и $H_r = 13,6 \%$.

Решение.

1. Условная химическая формула керосина заданного состава имеет вид

$$\frac{C_{86,14} H_{13,6}}{12 \quad 1} = C_{7,2} H_{13,6}.$$

2. Стехиометрический коэффициент состава топлива будет:

а) молярный

$$\chi_{\mu} = \frac{2 * 7,2 + 0,5 * 13,6}{8 - 2,1} = 3,537 \frac{\text{кмоль}}{\text{моль}};$$

б) весовой

$$\chi_0 = \chi_{\mu} \frac{\mu_0}{\mu_{\Gamma}} = 3,537 \frac{196}{100} = 6,933 \frac{\text{кг}}{\text{кг}}.$$

Те же результаты можно получить другим путем.

Для этого вычислим весовой элементарный состав тетранитрометана, т. е.

$$C_0 = \frac{12}{196} 100 = 6,12 \%; \quad N_0 = \frac{4 * 14}{196} 100 = 28,58 \%;$$

$$O_0 = \frac{8 * 16}{196} 100 = 65,30 \%;$$

При этом получим

$$\chi_0 = \frac{\frac{8}{3} C_{\Gamma} + 8 N_{\Gamma} - O_{\Gamma}}{O_0 - (\frac{8}{3} C_0 + 8 N_0)} = \frac{\frac{8}{3} 86,4 + 8 * 13,6}{65,3 - \frac{8}{3} 6,12} = 6,93 \frac{\text{кг}}{\text{кг}};$$

$$\chi_{\mu} = \chi_0 \frac{\mu_{\Gamma}}{\mu_0} = 6,93 \frac{100}{196} = 3,537 \frac{\text{кмоль}}{\text{кмоль}}$$

7.2.3 Примерный перечень заданий для решения прикладных задач

Задача № 1. Определить потери удельной тяги камеры двигателя относительно ее теоретического значения, имеющей $d_{кр}=222,7$ мм и $d_{в}=559$ мм, если во время ее стендовых огневых испытаний на топливе керосин + жидкий кислород при $\alpha=0,7$ замерены $P=10\ 850$ кг, $G_s=44,6$ кг/сек, $p_k=20,5$ ата и $p_a=1$ ата.

Решение.

1. По замеренным данным во время испытаний камеры получим:

а) удельную тягу камеры

$$P_{уд} = \frac{P}{G_s} = \frac{10\ 850}{44,6} = 243 \text{ кг сек/кг};$$

б) удельный импульс давления

$$\beta = \frac{p_k F_{кр}}{G_s} = \frac{20,6 \cdot 389,21}{44,6} = 180,5 \text{ кг сек/кг};$$

в) тягу в пустоте

$$P_{\Pi} = P + F_{в} p_{в} = 10\ 850 + 2449 \cdot 1 = 13\ 299 \text{ кг};$$

г) коэффициент тяги в пустоте

$$K_{\Pi} = \frac{P_{\Pi}}{p_k F_{кр}} = \frac{13\ 299}{20,6 \cdot 389,21} = 1,65;$$

д) удельную тягу в пустоте

$$P_{уд.п} = \frac{P_{п}}{G_s} = \frac{13\,299}{44,6} = 296 \text{ кг сек/кг.}$$

2. По графику $f_B = f\left(\frac{p_k}{p_a}, k\right)$ при $f_B = \frac{F_B}{F_{кр}} = \frac{d_B^2}{d_{кр}^2} = \frac{559^2}{222,7^2} = 6,3$ и $k = 1,18$ находим $\frac{p_k}{p_B} = 41$, а затем $p_B = \frac{p_k}{41} = \frac{20,5}{41} = 0,5 \text{ ата}$ (значение $k=1,18$ взято из таблицы данных термодинамического расчета камеры при $p_B = 1 \text{ ата}$).

3. По имеющейся таблице или термодинамическим расчетом камеры при ее замеренных рабочих параметрах (p_k и G_s) и ранее вычисленном $p_B = 0,5 \text{ ата}$ находим $P_{уд} = 257 \text{ кг кг/сек}$, $\beta_T = 181 \text{ кг кг/сек}$ и $K_{п.т} = 1,685$.

4. По ранее упомянутому графику $f_B = f\left(\frac{p_k}{p_a}, k\right)$ при оптимальной работе сопла камеры $\frac{p_k}{p_B} = 20,5$ и $k=1,18$ находим $f_{в.опт} = 3,8$ и $K_{п.т.опт} = 1,60$.

5. Удельная тяга при оптимальном режиме работы сопла камеры (при $p_B = p_a$)

$$\begin{aligned} P_{уд.опт} &= \beta_{\varphi c} K_{п.т.опт} - \frac{F_{кр} p_a}{G_s} f_{в.опт} = \beta \frac{K_{п}}{K_{п.т}} K_{п.т.опт} - \frac{F_{кр} p_a}{G_s} f_{в.опт} \\ &= 180,5 \frac{1,65}{1,685} 1,60 - \frac{389,21 \cdot 1}{44,6} 3,8 = 251,4 \text{ кг сек/кг.} \end{aligned}$$

6. Потеря удельной тяги камеры двигателя относительно ее теоретического значения:

$$\varphi_{уд} = 1 - \varphi_{уд.т} = 1 - \frac{P_{уд}}{P_{уд.т}} = 1 - \frac{243}{257} = 1 - 0,945 = 0,0545 = 5,45\%.$$

Эта потеря удельной тяги камеры обусловлена:

а) физической неполнотой сгорания топлива

$$\Delta\varphi_{p_k} = 1 - \frac{\beta}{\beta_T} = 1 - \frac{180,5}{181} = 1 - 0,997 = 0,003 = 0,3\%;$$

б) несовершенством работы сопла

$$\Delta\varphi_c = 1 - \varphi_c = 1 - \frac{K_{п}}{K_{п.т}} = 1 - \frac{1,65}{1,685} = 1 - 0,979 = 0,02 = 2\%;$$

в) неоптимальной работой сопла

$$\Delta\varphi_H = 1 - \varphi_H = 1 - \frac{P_{уд}}{P_{уд.опт}} = 1 - \frac{243}{251,4} = 1 - 0,966 = 0,033 = 3,3\%,$$

что в совокупности составляет

$$\Delta\varphi_{уд} = \Delta\varphi_{p_k} + \Delta\varphi_c + \Delta\varphi_H = 0,3 + 2 + 3,3 = 5,6\%$$

(ранее $\Delta\varphi_{уд} = 5,4\%$).

Если во время испытаний камеры часть тепла газов отводится через оболочку в охлаждающую проточную воду, то в этом случае появится дополнительная потеря удельной тяги, которую приближенно можно опреде-

лить по формуле

$$\Delta\varphi_{\text{охл}} = \Delta\varphi_{\text{уд}} - (\Delta\varphi p_k + \Delta\varphi_c + \Delta\varphi_n).$$

Более точно можно вычислить $\Delta\varphi_{\text{охл}}$ по количеству уносимого тепла охлаждающей проточной водой в течение определенного времени испытания камеры двигателя на заданном режиме работы. Для этого необходимо замерить расход охлаждающей воды за время испытания и ее температуру на входе в охлаждающий тракт камеры и выходе из него.

Задача №2. Определить показатель n политропы расширения газов в сопле камеры двигателя, если во время ее стендовых огневых испытаний замерены $p_k=1 \text{ ата}$ и $p_B = 1 \text{ ата}$; относительная входная площадь сопла $f_B = 3,88$.

Решение.

1. Задаемся $n=1,1; 1,2$ и $1,3$ и соответственно им вычисляем f_B по формуле

$$f_B = \frac{F_B}{F_{\text{кр}}} = \frac{\left(\frac{2}{n+1}\right)^{\frac{1}{n-1}} \cdot \sqrt{\frac{n-1}{n+1}}}{\sqrt{\left(\frac{p_B}{p_k}\right)^{\frac{2}{n}} - \left(\frac{p_B}{p_k}\right)^{\frac{n+1}{n}}}}.$$

2. По результатам вычислений строим график $f_B = f(n)$ и по этому графику при $f_B = 3,88$ находим искомое значение $n=1,21$.

Задача №3. Определить потерю тяги камеры двигателя относительно ее расчетного значения, а так же потерю расчетной теоретической тяги вследствие конусности сопла у выходного сечения при $\alpha_B = 16^\circ$, если замеренная тяга этой камеры $P=10 \text{ т}$, а расчетная теоретическая тяга при соответствующих замеренных рабочих параметрах (p_k, p_B, α и G_S) равна $P_T=10,8 \text{ т}$.

Решение.

1. Потеря тяги экспериментальной камеры относительно ее расчетного теоретического значения

$$\Delta P_{\text{тяги}} = 1 - \frac{P}{P_T} = 1 - \frac{10}{10,8} = 1 - 0,926 = 0,074 = 7,4\%.$$

2. Расчетная теоретическая тяга камеры с учетом потери энергии газов вследствие конусности сопла

$$\begin{aligned} P_{\text{т.кон}} &= P_T \varphi_{\text{рас}} = P_T \frac{1}{2} \left(1 - \cos \frac{\alpha_B}{2}\right) = 10,8 \cdot \frac{1}{2} \left(1 - \cos \frac{16^\circ}{2}\right) = 10,8 \cdot 0,995 \\ &= 10,746. \end{aligned}$$

3. Потеря расчетной теоретической тяги камеры вследствие конусности сопла

у выходного сечения

$$P_T = 1 - \varphi_{\text{рас}} = 1 - \frac{P_{T,\text{кон}}}{P_T} = 1 - \frac{10,747}{10,8} = 1 - 0,995 = 0,005 = 0,5\%, \text{ т. е. } 0,54 \text{ т.}$$

Задача №4. Определить скорость истечения газов из сопла камеры двигателя, если при ее стендовых огневых испытаниях были замерены $P=50$ т, $p_B=1,2$ ата, $p_a=1$ ата и $G_S=218$ кг сек/кг; $F_B=3200$ см².

Решение.

1. Эффективная скорость истечения газов из сопла камеры за счет статического числа тяги

$$\omega_{\text{эф}} = \frac{P}{G_S} g = \frac{50\ 000}{218} 9,81 = 2250 \text{ м/сек.}$$

2. Прирост скорости истечения газов из сопла камеры за счет статического числа тяги

$$\Delta\omega = \frac{F_B(p_B - p_a)}{G_S} g = \frac{3200(1,2 - 1)}{218} 9,81 = 22,8 \text{ м/сек.}$$

3. Скорость истечения газов в выходном сечении сопла камеры

$$\omega_B = \omega_{\text{эф}} - \Delta\omega = 2250 - 22,8 = 2227,2 \text{ м/сек.}$$

Эту же скорость можно определить по формуле тяги в общем виде, т. е.

$$\omega_B = \frac{P - F_B(p_B - p_a)}{G_S} g = \frac{50\ 000 - 3200(1,2 - 1)}{218} 9,81 = 2250 \text{ м/сек.}$$

Задача №5. Определить приближенно действительную температуру сгорания T_K жидкого аммиака с жидким фтором при $p_K=100$ ата и $\alpha = 1$, если расчетная теоретическая температура сгорания этого топлива $T_{K,T} = 4600^\circ\text{K}$.

Решение.

1. Принимаем коэффициент полноты давления газов в камере сгорания двигателя $\varphi_{p_K} = 0,98$.

2. Определяем коэффициент полноты температуры газов φ_T в камере сгорания двигателя по выражению

$$\varphi_{p_K} = \frac{\beta}{\beta_T},$$

где $\beta = \frac{R_K T_K}{A_K}$ и $\beta_T = \frac{\sqrt{R_{K,T} T_{K,T}}}{A_{K,T}}$.

Принимая (с небольшой погрешностью) $R_K = R_{K,T}$ и $A_K = A_{K,T}$, получим

$$\varphi_{p_K} \approx \sqrt{\frac{T_K}{T_{K,T}}} = \sqrt{\varphi_T},$$

откуда коэффициент полноты температуры газов будет

$$\varphi_T = \frac{T_K}{T_{K.T}} = \varphi_{p_K}^2 = 0,98^2 = 0,9604.$$

3. Действительная температура продуктов сгорания данного топлива равна

$$T_K \approx \varphi_T T_{K.T} = 0,9604 \cdot 4600 \approx 4418^\circ\text{K}.$$

Задача №6. Вычислить коэффициенты в удельной формуле азотной кислоты, молекулярная формула которой HNO_3 , $\mu = 63$.

Решение.

По уравнению (6.4)

$$\bar{a} = a/\mu = 1/63 = 0,01586;$$

$$\bar{b} = b/\mu = 1/63 = 0,01586; \quad \bar{c} = c/\mu = 3/63 = 0,0476.$$

Таким образом, удельная формула для 1 г азотной кислоты ($A_{\bar{a}} B_{\bar{b}} C_{\bar{c}} \dots$) запишется так: $\text{H}_{0,01586} \text{N}_{0,01586} \text{O}_{0,0476}$, а для 1 кг –

$$\text{H}_{15,86} \text{N}_{15,86} \text{O}_{4,76}.$$

Задача №7. Составить удельную формулу 96%-ной азотной кислоты. Молекулярная масса: $\mu_{\text{HNO}_3} = 63$ и $\mu_{\text{H}_2\text{O}} = 18$. Молекулярные формулы: азотной кислоты HNO_3 и воды H_2O .

Решение.

По уравнению (6.7) получим соответственно для водорода, азота и кислорода:

$$\bar{a} = 0,96 \cdot 1/63 + 0,04 \cdot 2/18 = 0,01963;$$

$$\bar{b} = 0,96 \cdot 1/63 + 0 = 0,01523;$$

$$\bar{c} = 0,96 \cdot 3/63 + 0,4 \cdot 1/18 = 0,0479.$$

Удельная формула для 1 г 96%-ного раствора азотной кислоты и воды запишется так: $\text{H}_{0,01963} \text{N}_{0,01523} \text{O}_{0,0479}$, а для 1 кг – $\text{H}_{19,63} \text{N}_{15,23} \text{O}_{4,79}$.

Задача №8. Рассчитать действительное соотношение между компонентами топлива, состоящего из горючего – диметилгидразина (молекулярная формула $\text{C}_2\text{H}_8\text{N}_2$ и молекулярная масса $\mu = 60,1$) и окислителя – 96%-ной четырех- окиси азота N_2O_4 , имеющего влажность 4%. Коэффициент избытка окислителя $\alpha = 0,85$. Составить условную формулу для всего топлива вида $\text{C}_a\text{H}_b\text{O}_d\text{N}_e$.

Решение.

Запишем удельную формулу для окислителя, заданного массовыми долями $g_1 = 0,96$ (для N_2O_4) и $g_2 = 0,04$ (для H_2O), по:

$$b_o = 0,96 \cdot 0/92 + 0,04 \cdot 2/18 = 0,04445 = 44,45;$$

$$d_o = 0,96 \cdot 4/92 + 0,04 \cdot 1/18 = 0,04394 = 43,94;$$

$$e_o = 0,96 \cdot 2/92 + 0,04 \cdot 0/18 = 0,2086 = 20,86.$$

Удельная формула для 1 г окислителя будет $H_{0,044}O_{0,044}N_{0,021}$. Молекулярную формулу для окислителя запишем в предположении условной молекулярной массы $\mu_{ок} = 100$. Тогда по молекулярная формула для окислителя $H_{0,445}O_{4,39}N_{2,086}$.

Дальнейшие расчеты проведем по молекулярным формулам. Пользуясь данными, по определим стехисметрическое соотношение между окислителем и горючим:

$$k'_{mo} = \frac{-\mu_{ок} \Delta_c a_{г} + \Delta_H b_{г} + \Delta_O d_{г} + \Delta_N e_{г}}{\mu_{г} \Delta_c a_{ок} + \Delta_H b_{ок} + \Delta_O d_{ок} + \Delta_N e_{ок}} =$$

$$= \frac{100}{60,1} \frac{(-4) \cdot 2 + (-1) \cdot 8}{(-1) \cdot 0,4445 + 2 \cdot 4,394} = -1,663 (-16)/8,343 = 3,19.$$

$$\text{По уравнению } k'_{mo} = k_{mo} \mu_{г}/\mu_o = 3,19 \cdot 60,1/100 = 1,917.$$

Действительное соотношение между компонентами по

$$k_m = \alpha k_{mo} = 0,85 \cdot 3,19 = 2,71; \quad k'_m = 0,85 \cdot 1,917 = 1,63.$$

Молекулярная формула для всего двухкомпонентного топлива п

$$C_a H_b O_d N_c = C_2 H_{8,75} O_{7,44} N_{5,52},$$

где $a = 2 + 1,63 \cdot 0$; $b = 8 + 1,63 \cdot 0,4445 = 8,75$; $d = 0 + 1,63 \cdot 4,394 = 7,44$; $e = 2 + 1,63 \cdot 2,086 = 5,52$.

При таком написании молекулярной формулы условная молекулярная масса по всего двухкомпонентного топлива $\mu = 12,01 \cdot 2 + 1,008 \cdot 8,75 + 16 \cdot 7,44 + 14,008 \cdot 5,52 = 129,2$.

Задача №9. Найти профиль высотного сопла двигателя, работающего в пустоте ($p_H = 0$).

Давление в камере $p_2 = 30 \text{ кг/см}^2$ ($2,96 \text{ Мн/м}^2$); площадь критического сечения $f_{кр} = 100 \text{ см}^2$; ($R_{кр} = 56,4 \text{ мм}$); $n_{из} = 1,2$; $R = 37 \text{ кг}\cdot\text{м/кг}\cdot\text{град}$ ($360 \text{ дж/кг}\cdot\text{град}$); $T_2 = 3650^\circ\text{К}$.

Решение. Задаемся давлением на срезе $p_3 = 0,075 \text{ кг/см}^2$ (7350 Мн/м^2).

1. Определим площадь среза сопла f_3 , а так же скорость ω_3 и плотность продуктов сгорания на срезе Q_3 . По формуле:

$$\frac{f_3}{f_{кр}} = \frac{\left(\frac{2}{n_{из} + 1}\right)^{\frac{1}{n_{из}-1}} \sqrt{\frac{n_{из}-1}{n_{из}+1}}}{\sqrt{\left(\frac{p_3}{p_2}\right)^{\frac{2}{n_{из}}} - \left(\frac{p_3}{p_2}\right)^{\frac{n_{из}+1}{n_{из}}}} = \frac{\left(\frac{2}{1,2+1}\right)^{\frac{1}{1,2-1}} \sqrt{\frac{1,2-1}{1,2+1}}}{\sqrt{\left(\frac{0,075}{30}\right)^{\frac{2}{1,2}} - \left(\frac{0,075}{30}\right)^{\frac{2,2}{1,2}}} = 34,7;$$

$$f_3 = 34,7 f_{кр} = 3470 \text{ см}^2;$$

$$R_3 = 322 \text{ мм};$$

$$\omega_3 = \sqrt{2g \frac{n_{из}}{n_{из}-1} RT_2 \left[1 - \left(\frac{p_3}{p_2} \right)^{\frac{n_{из}-1}{n_{из}}} \right]} =$$

$$\sqrt{2 \cdot 9,81 \frac{1,2}{1,2-1} \cdot 37 \cdot 3650 \left[1 - \left(\frac{0,075}{30} \right)^{\frac{1,2-1}{1,2}} \right]} = 3170 \text{ м/сек.}$$

По формуле:

$$M_3 = \sqrt{\frac{2}{n_{из}-1} \left[\left(\frac{p_2}{p_3} \right)^{\frac{n_{из}-1}{n_{из}}} - 1 \right]} = \sqrt{\frac{2}{1,2-1} \left[\left(\frac{30}{0,075} \right)^{\frac{1,2-1}{1,2}} - 1 \right]} = 4,14.$$

Определим Q_2 и Q_3 :

$$Q_2 = \frac{p_2}{gRT_2} = \frac{30 \cdot 10^4}{9,81 \cdot 37 \cdot 3650} = 0,227 \text{ кг} \cdot \text{сек}^2 / \text{м}^4 \quad (2,23 \text{ кг} / \text{м}^3);$$

$$Q_3 = Q_2 \left(\frac{p_3}{p_2} \right)^{\frac{1}{n_{из}}} = 0,227 \left(\frac{0,075}{30} \right)^{\frac{1}{1,2}} = 1,54 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{сек}^2 / \text{м}^4 \quad (0,0151 \text{ кг} / \text{м}^3).$$

2. Определить угол наклона контура на срезе сопла β_3 , обеспечивающий при заданных Q_3 и ω_3 оптимальный контур сопла. По формуле:

$$\sin 2\beta_3 = \frac{p_3 - p_H}{\frac{1}{2} Q_3 \omega_3^2} \sqrt{M_3^2 - 1} = \frac{0,075 \cdot 10^4 - 0}{\frac{1}{2} \cdot 1,54 \cdot 10^{-3} \cdot 3170^2} \sqrt{4,14^2 - 1} = 0,389,$$

откуда $2\beta_3 = 22^\circ 30'$; $\beta_3 = 11^\circ 15'$.

3. Зная β_3 и R_3 пользуясь графиком рис. 2.13, определяем угол β_m и длину сопла L_c :

$$\beta_m = 34^\circ 15'; \quad L_c = 12,4R_{кр} = 698 \text{ мм.}$$

4. Определяем радиусы скругления входной части сопла:

$$R_{скр} = 1,5R_{кр} = 1,5 \cdot 56,4 = 84,6 \text{ мм};$$

$$r_{скр} = 0,45R_{кр} = 22,6 \text{ мм.}$$

5. По данным β_m , β_3 и размеры определяем профиль сопла, аппроксимируя параболой контур сопла.

Задача №10. Определить объем баллона для сжатого воздуха и массу воздуха в баллоне для ЖРД с баллонной подачей, если полный объем бака с горючим равен $V_r = 0,209 \text{ м}^3$, а объем бака окислителя $V_o = 0,472 \text{ м}^3$. Давление подачи компонентов из баков $p_6 = 30 \text{ кг} / \text{см}^2$ ($2,94 \text{ Мн} / \text{м}^2$). Начальная температура газа $T_{г.нач} = 299^\circ \text{К}$. Давление в баллоне принимаем равным $250 \text{ кг} / \text{см}^2$ ($24,53 \text{ Мн} / \text{м}^2$).

Решение. Определяем суммарный объем баков горючего и окислителя

$$V_6 = V_r + V_o = 0,209 + 0,472 = 0,681 \text{ м}^3.$$

Считаем, что редуктор обеспечивает нормальную подачу при разности

давлений в баллоне и баке, равной $\Delta p_{\text{ред}} = 7 \text{ кг/см}^2 (0,67 \text{ Мн/м}^2)$.

Находим давление в баллоне к концу работы

$$p_{\text{г.кон}} = p_6 + \Delta p_{\text{ред}} = 30 + 7 = 37 \text{ кг/см}^2 (0,67 \text{ Мн/м}^2).$$

Отношение начального давления в баллоне к конечному равно

$$\frac{p_{\text{г.нач}}}{p_{\text{г.кон}}} = \frac{250}{37} = 6,75.$$

По таблице находим коэффициенты c_1 и c_2 для этого отношения:

$$c_1 = 0,61; \quad c_2 = 0,81.$$

По формуле находим объем баллона:

$$V_{\text{газ}} = \frac{p_6 V_6 \frac{c_1}{c_2}}{c_1 p_{\text{г.нач}} - (p_6 + \Delta p_{\text{ред}})} = \frac{30 \cdot 10^4 \cdot 0,681 \cdot \frac{0,61}{0,81}}{0,61 \cdot 250 \cdot 10^4 - (30 \cdot 10^4 + 7 \cdot 10^4)} = 0,156 \text{ м}^3.$$

Массу газа, заключенного в баллоне, определяем по уравнению состояния:

$$p_{\text{г.нач}} V_{\text{газ}} = G_{\text{газ}} R T_{\text{г.нач}},$$

откуда
$$G_{\text{газ}} = \frac{p_{\text{г.нач}} V_{\text{газ}}}{R T_{\text{г.нач}}} = \frac{250 \cdot 10^4 \cdot 0,156}{29,3 \cdot 293} = 45,4 \text{ кг}.$$

7.2.4 Примерный перечень вопросов для подготовки к зачету

Не предусмотрено учебным планом

7.2.5 Примерный перечень вопросов для подготовки к экзамену

1. Общие сведения о ракетных двигателях. Терминология и специфические особенности РД. Классификация и основы устройства ЖРД. Основные параметры, характеризующие ЖРД. Области применения ЖРД. Краткий обзор развития ЖРД.

2. Основы расчетов термохимических свойств топлива. Расчеты по составу компонентов. Энтальпия топлива. Системы отсчета полных энтальпий. Вычисление полной энтальпии по теплотам реакций.

3. Расчеты по составу компонентов. Зависимость констант равновесия реакций, энтальпии и энтропии от температуры и изменения агрегатных состояний. Реакции диссоциации при сгорании топлив. Система уравнений для определения температуры в камере и на срезе сопла

4. Тяга ЖРД. Общие сведения. Определение тяги как равнодействующей сил давления. Анализ формулы тяги. Удельный импульс тяги – виды, интегральное определение. Основные составляющие тяги и место их приложения.

5. Расчет сгорания и истечения топлива. Понятие о равновесном составе газов. Уравнения химического равновесия. Константы химического равновесия.

6. Расчет тяги и удельного импульса с использованием газодинамических функций. О форме сверхзвукового сопла

7. Вычисления по константам равновесия. Уравнения сохранения ве-

щества при химических реакциях. Система уравнений для расчета равновесного состава продуктов сгорания при заданной температуре и давлении.

8. Характеристики ЖРД. Общие сведения. Дроссельная характеристика. Высотная характеристика.

9. Расчет теоретической температуры и равновесного состава ПС в сопле камеры ЖРД при изоэнтропическом течении. Расчет теоретических параметров истечения.

10. Топлива ЖРД. Основные сведения о топливах и их физико-химических характеристиках. Требования к топливам. Энергетические характеристики топлива. Определение стехиометрического и действительного соотношения компонентов топлива.

11. Процессы в камере ЖРД. Смесеобразование.

12. Теория и расчет однокомпонентных центробежных форсунок без учета вязкости компонентов топлива. Расчет с учетом вязкости. Расчет струйных газовых и жидкостных однокомпонентных форсунок.

13. Неустойчивость рабочего процесса ЖРД. Классификация неустойчивых режимов. Меры предотвращения ВЧ и НЧ неустойчивости.

14. Расчет двухкомпонентных центробежных и струйно-центробежных форсунок с внешним и внутренним смешением компонентов топлива. Влияние конструктивных факторов на гидравлику центробежных форсунок. Расчетные соотношения

15. Сопла ЖРД. Оценка совершенства, потери и схемы сопел ЖРД. Анализ и оценка потерь в соплах. Геометрическая степень расширения, геометрический комплекс A_k , расчетные соотношения.

16. Распыливание топлива. Смешение компонентов топлива. Испарение топлива. Воспламенение топлива. Расчет и выбор объема камеры сгорания. Расчет и выбор безразмерной площади камеры сгорания.

17. Основы профилирования сопел Лавалья. Построение газодинамического профиля камеры ЖРД. Схемы сопел. Метод решения задач осесимметричных потоков, метод характеристик. Скругленная угловая точка и сопла с угловым входом.

18. Основы теории теплообмена в камере ЖРД. Особенности конвективного теплообмена в условиях камеры ЖРД. Расчетные соотношения для определения безразмерных коэффициентов трения и теплоотдачи газового потока.

19. Пневмогидравлические системы ЖРД. Системы подачи топлива ЖРД, их особенности, преимущества и недостатки. Порядок и методы определения системы подачи топлива.

20. Расчетные соотношения для конвективного теплового потока и трения в камере ЖРД.

21. Системы подачи топлива ЖРД. Характеристики, конструкция и анализ разных типов огневых днищ. Расчетные соотношения для выпуклых и плоских днищ.

22. Виды тепловых потоков в камере ЖРД. Расчетные соотношения тепловых потоков в камере ЖРД. Лучистый теплообмен – особенности, рас-

четные соотношения. Графическое изображение распределения теплового потока вдоль камеры ЖРД..

23. Запуск ЖРД. Останов ЖРД. Регулирование ЖРД. Массовое совершенство ДУ ЖРД.

24. Теплозащита стенок камеры ЖРД. Особенности и схемы теплозащиты стенок камеры ЖРД. Физические основы различных схем теплозащиты. Основные особенности и требования, предъявляемые к наружному охлаждению.

25. Циклограмма работы двигателя. Форсирование тяги. Дросселирование тяги.

26. Теплоотдача оребренной поверхности стенки в охлаждающую жидкость. Интенсификация наружного проточного охлаждения. Особенности расчета тепловых потоков в стенку при завесном охлаждении.

27. Численный метод решения системы химического равновесия при выполнении термодинамического расчета ЖРД.

28. Внутреннее охлаждение. Теплоизоляционная защита. Потери удельного импульса в связи с организацией тепловой защиты.

29. Метод расчета равновесного состава и температуры в камере сгорания, выходном и критическом сечениях сопла.

30. Газодинамическое профилирование камеры ЖРД. Расчет основных размеров камеры двигателя: диаметра критического сечения, выходного сечения, радиуса цилиндрической части камеры сгорания, радиусов контура входной части и ее длины, координат точек сопряжения и т.д.

31. Расчет контура сверхзвуковой части сопла ЖРД. Методы уменьшения массогабаритных параметров сопла. Режимы работы сопла, расчетные соотношения.

32. Внутрикамерные процессы в ЖРД. Смесеобразование, горение. Выбор оптимального давления в камере сгорания. Расчетная схема для определения тяги камеры по теореме импульсов.

33. Основные параметры, характеризующие жидкостные ракетные двигатели (ЖРД). Формулы Циолковского и Мещерского. Определение массы ракеты-носителя по ступеням.

34. Расчет контура сверхзвуковой части сопла ЖРД

35. Характеристические параметры ЖРД; удельный импульс, характеристическая скорость, коэффициент тяги сопла, удельная масса.

36. Расчет наружного охлаждения ЖРД. Расчет конвективных и лучистых тепловых потоков. Поверочный расчет наружного охлаждения.

37. Методы расчета конвективного теплообмена на основе теории подобия. Расчетные соотношения для определения трения в камере сгорания.

38. Типы ракетных двигателей (РД). Классификация РД. Ракетные двигатели на химических топливах.

39. Расчет лучистого теплового потока. Поверочный расчет наружного охлаждения.

40. Определение массы запасенного топлива на борту. Расчет объема топливных баков.

41. Оценка потерь в камере ЖРД.
42. Стандартный порядок расчета наружного охлаждения. Алгоритм расчета на ЭВМ.
43. Вытеснительная система подачи топлива, особенности, область применения. Способы и расчет систем наддува топливных баков. Определение потерь давления и напора при вытеснительной подаче компонентов топлива.
44. Турбонасосные схемы без дожигания и с дожиганием, их особенности, области применения.
45. Виды газогенераторов в ЖРД. Их особенности, преимущества и недостатки.
46. Составление структурной схемы двигателя и расчет основных параметров. Определение давлений подачи компонентов. Определение расходов. Порядок расчета схемы с дожиганием, расчетные соотношения. Принцип работы, преимущества и недостатки работы ЖРД с полной газификацией компонентов топлива.
47. Методы повышения удельного импульса ЖРД, надежности, ресурса. Перспективы применения эффективных топлив. Оценка эффективности топлив. Обеспечение многообразности применения ЖРД.

7.2.6. Методика выставления оценки при проведении промежуточной аттестации

Экзамен проводится по тест-билетам, каждый из которых содержит 2 вопроса и задачу. Критерии оценивания ответа студента на промежуточной аттестации по дисциплине:

1. Оценка «Неудовлетворительно» ставится, если: теоретический вопрос не раскрыт; отсутствует порядок решения практического задания или он содержит грубые ошибки. Несоответствие требуемым в ходе освоения дисциплины «знаниям», «умениям», «владениям».

2. Оценка «Удовлетворительно» ставится, если: теоретический вопрос раскрыт не полностью; наводящие вопросы не исправляют положение; порядок решения практического задания содержит ошибки. Частичное соответствие требуемым в ходе освоения дисциплины «знаниям», «умениям», «владениям».

3. Оценка «Хорошо» ставится, если: теоретический вопрос раскрыт не полностью, а наводящие вопросы исправляют положение; порядок решения практического задания содержит отдельные погрешности. Не полное соответствие требуемым в ходе освоения дисциплины «знаниям», «умениям», «владениям».

4. Оценка «Отлично» ставится, если: теоретический вопрос раскрыт полностью; порядок решения практического задания верен. Полное соответствие требуемым в ходе освоения дисциплины «знаниям», «умениям», «владениям».

7.2.7 Паспорт оценочных материалов

№ п/п	Контролируемые разделы (темы) дисциплины	Код контролируемой компетенции	Наименование оценочного средства
1	Основы теории и устройства ЖРД	ПК-1, ПК-2	Тест, устный опрос, защита лабораторных работ, требования к курсовому проекту
2	Расчет и согласование основных параметров схемы двигателя	ПК-1, ПК-2	Тест, устный опрос, защита лабораторных работ, требования к курсовому проекту
3	Термодинамический расчет	ПК-1, ПК-2	Тест, устный опрос, защита лабораторных работ, требования к курсовому проекту
4	Расчет системы смесеобразования	ПК-1, ПК-2	Тест, устный опрос, защита лабораторных работ, требования к курсовому проекту
5	Расчет наружного охлаждения	ПК-1, ПК-2	Тест, устный опрос, защита лабораторных работ, требования к курсовому проекту
6	Газодинамическое профилирование	ПК-1, ПК-2	Тест, устный опрос, защита лабораторных работ, требования к курсовому проекту
7	Неустойчивость рабочего процесса в ЖРД	ПК-1, ПК-2	Тест, устный опрос, защита лабораторных работ, требования к курсовому проекту
8	Математическое моделирование рабочих процессов в ЖРД	ПК-1, ПК-2	Тест, устный опрос, защита лабораторных работ, требования к курсовому проекту

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

Тестирование осуществляется, либо при помощи компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных тест-заданий на бумажном носителе. Время тестирования 30 мин. Затем осуществляется проверка теста экзаменатором и выставляется оценка согласно методики выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

Решение стандартных задач осуществляется, либо при помощи компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных задач на бумажном носителе. Время решения задач 30 мин. Затем осуществляется

проверка решения задач экзаменатором и выставляется оценка, согласно методики выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

Решение прикладных задач осуществляется, либо при помощи компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных задач на бумажном носителе. Время решения задач 30 мин. Затем осуществляется проверка решения задач экзаменатором и выставляется оценка, согласно методики выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

Защита курсового проекта или отчета по всем видам практик осуществляется согласно требованиям, предъявляемым к работе, описанным в методических материалах. Примерное время защиты на одного студента составляет 20 мин.

8 УЧЕБНО МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ)

8.1 Перечень учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины

№ п/п	Авторы, составители	Заглавие	Год издания Вид издания	Обес- пе- чен- ность
8.1.1 Основная литература				
8.1.1.1	Добровольский М.В.	Жидкостные ракетные двигатели. – М.: Машиностроение, 2005.	2005 печат.	1,0
8.1.2 Дополнительная литература				
8.1.2.1	Рубинский В.Р. Дроздов И.Г. Кретинин А.В.	Теория, расчет и проектирование ЖРД: курсовое проектирование (учеб. пособие). Воронеж : Изд-во ВГТУ, 2013.	2013 печат.	1,0
8.1.2.2	Дроздов И.Г. Шматов Д.П. Кретинин А.В.	Теплофизические расчеты рабочих процессов в камерах сгорания энергетических установок (учеб. пособие)/ Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т, 2014.	2014 печат.	1,0
8.1.3 Методические разработки				
8.1.3.1	Горохов В.Д., Дроздов И.Г., Кретинин А.В.	Методические указания для выполнения практических и самостоятельных работ по дисциплине «Теория и расчет жидкостных ракетных двигателей» для студентов специальности 160700.65, 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей» очной формы обучения / ФГБОУ ВПО "Воронежский государственный технический университет"; сост. В.Д. Горохов, И.Г. Дроздов, А.В. Кретинин. Воронеж, 2015.	2015 Электр.	1,0

		25 с. (406-2015)		
8.1.3.2	Горохов В.Д., Дроздов И.Г., Кретицин А.В.	Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Теория и расчет жидкостных ракетных двигателей» специальности 160700.65, 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей» очной формы обучения / ФГБОУ ВПО "Воронежский государственный технический университет"; сост. В.Д. Горохов, И.Г. Дроздов, А.В. Кретицин. Воронеж, 2015. 46 с. (405-2015)	2015 Электр	1,0

8.2 Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине, включая перечень лицензионного программного обеспечения, ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», современных профессиональных баз данных и информационных справочных систем:

1. <http://www.knigafund.ru> - Электронно-библиотечная система «КнигаФонд» - учебная и научная литература.
2. Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.
3. Электронно-библиотечная система IPRbooks.

9 МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ БАЗА, НЕОБХОДИМАЯ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА

9.1	Специализированные лекционные аудитории, оснащенные оборудованием для лекционных демонстраций и проекционной аппаратурой.
9.2	Специализированная лаборатория гидрогазодинамики, оснащенная стендами для лабораторных работ: <ul style="list-style-type: none"> – стенд № 4 отдела 118 ЗРД АО КБХА Гидрогазодинамических испытаний узлов и ДСЕ; – стенд № 1 отдела 118 ЗРД АО КБХА Гидродинамических испытаний узлов и ДСЕ; – стенд № 12 отдела 118 ЗРД АО КБХА Гидродинамических испытаний узлов и ДСЕ; – стенд № 9 отдела 118 ЗРД АО КБХА Гидрогазодинамических испытаний узлов и ДСЕ; – «Основы газовой динамики» ЭЛБ-ОГД-1.

10. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

По дисциплине «Теория и расчет жидкостных ракетных двигателей» читаются лекции, проводятся практические занятия и лабораторные работы, выполняется курсовой проект.

Основой изучения дисциплины являются лекции, на которых излагаются наиболее существенные и трудные вопросы, а также вопросы, не нашедшие отражения в учебной литературе.

Практические занятия направлены на приобретение практических навыков расчета термодинамических и газодинамических параметров ракетных двигателей. Занятия проводятся путем решения конкретных задач в аудитории.

Лабораторные работы выполняются на лабораторном оборудовании в соответствии с методиками, приведенными в указаниях к выполнению работ.

Методика выполнения курсового проекта изложена в учебно-методическом пособии. Выполнять этапы курсового проекта должны своевременно и в установленные сроки.

Контроль усвоения материала дисциплины производится проверкой курсового проекта, защитой курсового проекта.

Вид учебных занятий	Деятельность студента
Лекция	Написание конспекта лекций: кратко, схематично, последовательно фиксировать основные положения, выводы, формулировки, обобщения; пометать важные мысли, выделять ключевые слова, термины. Проверка терминов, понятий с помощью энциклопедий, словарей, справочников с выписыванием толкований в тетрадь. Обозначение вопросов, терминов, материала, которые вызывают трудности, поиск ответов в рекомендуемой литературе. Если самостоятельно не удастся разобраться в материале, необходимо сформулировать вопрос и задать преподавателю на лекции или на практическом занятии.
Практическое занятие	Конспектирование рекомендуемых источников. Работа с конспектом лекций, подготовка ответов к контрольным вопросам, просмотр рекомендуемой литературы. Прослушивание аудио- и видеозаписей по заданной теме, выполнение расчетно-графических заданий, решение задач по алгоритму.
Лабораторная работа	Лабораторные работы позволяют научиться применять теоретические знания, полученные на лекции при решении конкретных задач. Чтобы наиболее рационально и полно использовать все возможности лабораторных для подготовки к ним необходимо: следует разобрать лекцию по соответствующей теме, ознакомиться с соответствующим разделом учебника, проработать дополнительную литературу и источники, решить задачи и выполнить другие письменные задания.
Самостоятельная работа	Самостоятельная работа студентов способствует глубокому усвоению учебного материала и развитию навыков самообразования. Самостоятельная работа предполагает следующие составляющие: <ul style="list-style-type: none"> - работа с текстами: учебниками, справочниками, дополнительной литературой, а также проработка конспектов лекций; - выполнение домашних заданий и расчетов; - работа над темами для самостоятельного изучения; - участие в работе студенческих научных конференций, олимпиад;

	- подготовка к промежуточной аттестации.
Подготовка к промежуточной аттестации	Готовиться к промежуточной аттестации следует систематически, в течение всего семестра. Интенсивная подготовка должна начаться не позднее, чем за месяц-полтора до промежуточной аттестации. Данные перед экзаменом, экзаменом три дня эффективнее всего использовать для повторения и систематизации материала.