

Убн

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования



**Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет**  
Аэрокосмический факультет

Кафедра «Ракетно-космическая техника и энергетические системы»



**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по учебной работе  
д-р техн. наук, проф.

Н.В. Лобов

2017 г.

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДИСЦИПЛИНЫ**

«Динамика и прочность ракетных двигателей»

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

Программа специалитета

Специальность 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей»

Специализация программы специалитета

Проектирование ракетных двигателей  
твёрдого топлива

Квалификация выпускника:

инженер

Выпускающая кафедра:

Ракетно-космическая техника и  
энергетические системы

Форма обучения:

очная

Курс: 5

Семестр(ы): 9

Трудоемкость:

Кредитов по рабочему учебному плану:

4

Часов по рабочему учебному плану:

144

Виды контроля:

Экзамен: –

Зачет: 9

Курсовой проект: –

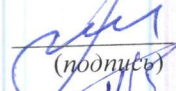
Курсовая работа: –

**Учебно-методический комплекс дисциплины «Динамика и прочность ракетных двигателей»** разработан на основании:

- самостоятельно устанавливаемого образовательного стандарта по специальности 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей», утвержденного приказом ректора от 03 апреля 2017 г., номер приказа №24-О;
- компетентностной модели выпускника ОПОП по специальности 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей», специализации «Проектирование ракетных двигателей твердого топлива», утверждённой 03 апреля 2017 г.;
- базового учебного плана очной формы обучения по специальности 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей», специализации «Проектирование ракетных двигателей твердого топлива», утвержденного 03 апреля 2017 г.

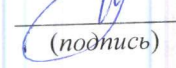
**Рабочая программа согласована** с рабочими программами дисциплин «Теория, расчет и проектирование ракетных двигателей твердого топлива», «Вычислительные технологии в авиадвигателестроении», «Основы конструирования ракетных двигателей твердого топлива», «Проектирование зарядов твердых ракетных топлив», «Конструирование и инженерные методы расчета РДТТ», «Конструирование и инженерные методы расчета ЖРД», «Конструкция ракетных двигателей твердого топлива», «САЕ-системы в механике деформируемого твердого тела», «САЕ-системы в механике жидкости и газа» и программами производственной и преддипломной практик, участвующих в формировании компетенций совместно с данной дисциплиной.

Разработчик д-р техн. наук, проф.  
(ученая степень, звание)

  
(подпись)

А.Ф. Сальников  
(инициалы, фамилия)

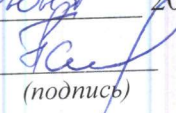
Рецензент д-р техн. наук, проф.  
(ученая степень, звание)

  
(подпись)

Р.В. Бульбович  
(инициалы, фамилия)

**Рабочая программа рассмотрена и одобрена на заседании кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» «06» июня 2017 г., протокол № 19.**

Заведующий кафедрой «Ракетно-космическая техника и энергетические системы», ведущей дисциплину д-р техн. наук, проф.  
(ученая степень, звание)

  
(подпись)

М.И. Соколовский  
(инициалы, фамилия)

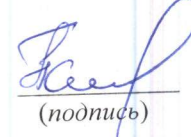
**Рабочая программа одобрена учебно-методической комиссией Аэрокосмического факультета «21» 06 2017 г., протокол № 9.**

Председатель учебно-методической комиссии аэрокосмического факультета канд. техн. наук, доц.  
(ученая степень, звание)

  
(подпись)

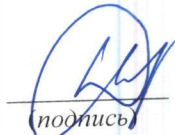
Н.Е. Чигодаев  
(инициалы, фамилия)

**Согласовано:**  
Заведующий выпускающей кафедрой «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» д-р техн. наук, проф.  
(ученая степень, звание)

  
(подпись)

М.И. Соколовский  
(инициалы, фамилия)

Начальник управления образовательных программ канд. техн. наук, доц.  
(ученая степень, звание)

  
(подпись)

Д.С. Репецкий  
(инициалы, фамилия)

## 1 Общие положения

### 1.1 Цели дисциплины

**Цель учебной дисциплины** – формирование комплекса знаний, умений и навыков, необходимых для решения прикладных проблем прочностных расчетов конструктивных элементов и узлов ракетных двигателей с учетом динамических нагрузок, возникающих в процессе их функционирования на этапах их разработки и проектирования.

В процессе изучения данной дисциплины студент осваивает следующие профессионально-специализированные компетенции:

– способность выполнять расчёты параметров рабочего процесса, нагруженности, прочностного, теплового состояния, характеристик ракетных двигателей твёрдого топлива, их деталей, узлов и систем и осуществлять их конструирование (АПСК-3).

### 1.2 Задачи дисциплины:

- изучение методов расчета напряжений и деформаций отдельных элементов конструкции ракетного двигателя;
- освоение программы конечно-элементного анализа для проведения прочностных расчетов и анализа конструкций на устойчивость;
- освоение теоретических знаний о роли и месте динамических нагрузок в формировании работоспособности и надежности ракетных двигателей, и их неоднозначности в воздействии на материал, конструктивные элементы их конструкцию;
- освоение приемов и методов проведения динамического анализа и расчета прочности, оценки надежности конструкции ракетных двигателей для различных этапов их жизненного цикла;
- развитие умений выбора методов и методик прочностных расчетов конструктивных элементов ракетных двигателей с учетом динамических нагрузок, и освоении навыков основных расчетных алгоритмов в процессе их разработки и проектирования.

### 1.3 Предметом изучения дисциплины являются следующие объекты:

- ракетные двигатели на жидком и твердом топливе;
- методы расчетов на прочность и жесткость различных конструкций;
- процессы динамического нагружения и деформирования конструктивных элементов ракетного двигателя и зарядов РДТТ;
- методы выбора расчетных схем прочности и жесткости конструкций летательных аппаратов и их подсистем;
- модели оценки прочности и устойчивости основных элементов и узлов ракетных двигателей;
- модели материала; модели формы конструкции ракетных двигателей;
- модели нагружения и модели разрушения конструктивных элементов ракетного двигателя;
- запасы прочности, долговечность и ресурс ракетного двигателя;
- методы анализа прочностной надежности типовых элементов и узлов ракетного двигателя.

#### 1.4 Место учебной дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина «Динамика и прочность ракетных двигателей» относится к базовой части блока 1 «Дисциплины (модули)» дисциплин рабочего учебного плана и является обязательной при освоении ОПОП по специальности 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей», специализации «Проектирование ракетных двигателей твердого топлива».

После изучения дисциплины обучающийся должен освоить части указанных в пункте 1.1 компетенций и продемонстрировать следующие результаты:

- **знать:**

- методы расчетов на прочность и жесткость различных конструкций;
- методы выбора расчетных схем прочности и жесткости конструкций ракетных двигателей и их подсистем;
- природу колебательных процессов, виды и структуру колебательных процессов и волновых взаимодействий;
- математический аппарат, описывающий колебательные движения в механике, преобразования Лапласа, Фурье, функции Бесселя и Неймана; системы координат и преобразования систем координат;
- физические уравнения связей в конструкции объекта в зависимости от количества степеней свободы рассматриваемого соединения или объекта;
- методы расчета на прочность, устойчивость конструктивных элементов объекта, балок с учетом внешних сил и моментов;
- основы динамического поведения элементной базы ракетного двигателя;
- влияние на динамические нагрузки конструкции ракетного двигателя;

- **уметь:**

- составлять расчетные схемы определения динамических нагрузок для конструктивного элемента объекта с постановкой начальных и граничных условий;
- выбирать методы и приемы расчетов на прочность, устойчивость конструктивных элементов ракетного двигателя;
- определять расчетные напряжения и деформации с анализом динамического состояния и действия нагрузок в конструктивных элементах ракетного двигателя;
- использовать методики расчета на прочность и устойчивость элементов конструкций ракет и космических аппаратов с применением программ конечно-элементного анализа;
- проводить исследования физических и прочностных свойств материалов;

- **владеть:**

- навыками определения основных расчетных нагрузок, действующих на конструктивные элементы и узлы ракетного двигателя;
- навыками проведения прочностных расчетов с учетом действия динамических нагрузок;
- навыками работы с технической литературой с проведением анализа по выбору методик расчета прочностных характеристик и устойчивости конструктивных элементов.

В таблице 1.1 приведены предшествующие и последующие дисциплины, направленные на формирование компетенций, заявленных в пункте 1.1.

Таблица 1.1 – Дисциплины, направленные на формирование компетенций

Код	Наименование компетенции	Предшествующие дисциплины	Последующие дисциплины (группы дисциплин)
<b>Профессионально-специализированные компетенции</b>			
АПСК-3	Способность выполнять расчёты параметров рабочего процесса, нагруженности, прочностного, теплового состояния, характеристик ракетных двигателей твёрдого топлива, их деталей, узлов и систем и осуществлять их конструирование	Вычислительные технологии в авиадвигателестроении, Основы конструирования ракетных двигателей твёрдого топлива, Теория, расчет и проектирование ракетных двигателей твёрдого топлива, Проектирование зарядов твёрдых ракетных топлив, Конструирование и инженерные методы расчета РДТТ, Конструирование и инженерные методы расчета ЖРД.	Конструкция ракетных двигателей твёрдого топлива, САЕ-системы в механике деформируемого твёрдого тела, САЕ-системы в механике жидкости и газа, Производственная практика (стажировка проектно-конструкторская), Преддипломная практика (практика по выполнению выпускной квалификационной работы).

## 2 Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы

Учебная дисциплина обеспечивает формирование части компетенции АПСК-3.

### 2.1 Дисциплинарная карта компетенции АПСК-3

Код	Формулировка компетенции
АПСК-3	Способность выполнять расчёты параметров рабочего процесса, нагруженности, прочностного, теплового состояния, характеристик ракетных двигателей твёрдого топлива, их деталей, узлов и систем и осуществлять их конструирование

Код	Формулировка дисциплинарной части компетенции
АПСК-3.Б1.Б.30	Способность выполнять расчеты с учетом динамических нагрузок в процессе конструирования деталей, узлов и элементов ракетных двигателей

### Требования к компонентному составу компетенции

Перечень компонентов	Виды учебной работы	Средства оценки
<p><b>Знает:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– методы расчетов на прочность и жесткость различных конструкций;</li> <li>– методы выбора расчетных схем прочности и жесткости конструкций ракетных двигателей и их подсистем;</li> <li>– природу колебательных процессов, виды и структуру колебательных процессов и волновых взаимодействий;</li> <li>– математический аппарат, описывающий колебательные движения в механике, преобразования Лапласа, Фурье, функции Бесселя и Неймана; системы координат и преобразования систем координат;</li> <li>– физические уравнения связей в конструкции объекта в зависимости от количества степеней свободы рассматриваемого соединения или объекта;</li> <li>– методы расчета на прочность, устойчивость конструктивных элементов объекта, балок с учетом внешних сил и моментов;</li> <li>– основы динамического поведения элементной базы ракетного двигателя;</li> </ul>	<p>Лекции с использованием мультимедиа-технологий самостоятельная работа студентов.</p>	<p>Контрольные тестовые вопросы текущего и рубежного контроля.</p>

<p>– влияние на динамические нагрузки конструкции ракетного двигателя.</p>		
<p><b>Умеет:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– составлять расчетные схемы определения динамических нагрузок для конструктивного элемента объекта с постановкой начальных и граничных условий;</li> <li>– выбирать методы и приемы расчетов на прочность, устойчивость конструктивных элементов ракетного двигателя;</li> <li>– определять расчетные напряжения и деформации с анализом динамического состояния и действия нагрузок в конструктивных элементах ракетного двигателя;</li> <li>– использовать методики расчета на прочность и устойчивость элементов конструкций ракет и космических аппаратов с применением программ конечно-элементного анализа;</li> <li>– проводить исследования физических и прочностных свойств материалов.</li> </ul>	<p>Лабораторные работы. Практические занятия с элементами деловых игр, анализа и решения ситуационных задач; самостоятельная работа студентов.</p>	<p>Отчёты по лабораторным работам. Задания практических занятий.</p>
<p><b>Владеет:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– навыками определения основных расчетных нагрузок, действующих на конструктивные элементы и узлы ракетного двигателя;</li> <li>– навыками проведения прочностных расчетов с учетом действия динамических нагрузок;</li> <li>– навыками работы с технической литературой с проведением анализа по выбору методик расчета прочностных характеристик и устойчивости конструктивных элементов ракетного двигателя.</li> </ul>	<p>Лабораторные работы. Практические занятия с элементами деловых игр, анализа и решения ситуационных задач самостоятельная работа студентов.</p>	<p>Отчёты по лабораторным работам. Задания практических занятий.</p>

### 3 Структура учебной дисциплины по видам и формам учебной работы

Объем дисциплины в зачетных единицах составляет 4 ЗЕ. Количество часов, выделенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающихся указано в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Объём и виды учебной работы

№ п.п.	Виды учебной работы	Трудоемкость, час.
1	<b>Аудиторная (контактная) работа</b>	<b>72</b>
	– лекции (Л)	32
	– практические занятия (ПЗ)	18
	– лабораторные работы (ЛР)	18
	<b>Контроль самостоятельной работы (КСР)</b>	<b>4</b>
2	<b>Самостоятельная работа</b>	<b>72</b>
	– изучение теоретического материала	36
	– подготовка к практическим занятиям	18
	– подготовка отчетов по лабораторным работам	18
3	<b>Итоговый контроль (промежуточная аттестация обучающихся) по дисциплине</b>	<b>Зачет</b>
4	<b>Трудоёмкость дисциплины, всего:</b>	
	в часах (ч)	<b>144</b>
	в зачётных единицах (ЗЕ)	<b>4</b>



## 4 Содержание учебной дисциплины

### 4.1 Модульный тематический план

Таблица 4.1 – Тематический план по модулям учебной дисциплины

Номер учебного модуля	Номер раздела дисциплины	Номер темы дисциплины	Количество часов и виды занятий (очная форма обучения)						Итоговый контроль	Самостоятельная работа	Трудоёмкость, ч/ЗЕТ
			Аудиторная работа					КСП			
			Всего	Л	ПЗ	ЛР	КСП				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1	1	Введение	1	1							1
		1	2	2					4		6
		2	4	2		2			4		8
		3	6	2	2	2			6		12
		4	7	3	2	2			6		13
		5	6	4	2				6		12
		6	4	2		2			6		10
		7	4	2	2				4		8
		<b>Всего по модулю:</b>	<b>36</b>	<b>18</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>2</b>		<b>36</b>		<b>72/2</b>
2	2	8	6	2	2	2			6		12
		9	6	2	2	2			6		12
		10	4	2		2			4		8
		11	6	2	2	2			6		12
		12	6	2	2	2			6		12
		13	4	2	2				4		8
		14	2	2					4		6
		<b>Всего по модулю:</b>	<b>36</b>	<b>14</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>2</b>		<b>36</b>		<b>72/2</b>
<b>Промежуточная аттестация</b>								<b>Зачет</b>			
<b>Всего:</b>			<b>72</b>	<b>32</b>	<b>18</b>	<b>18</b>	<b>4</b>	<b>–</b>	<b>72</b>		<b>144/4</b>

### 4.2. Содержание разделов и тем учебной дисциплины

**Модуль 1. Расчет на прочность и устойчивость основных конструктивных элементов ракетных двигателей**

**Раздел 1. Расчет на прочность и устойчивость основных конструктивных элементов ракетных двигателей**

Л – 18 ч; ПЗ – 8 ч; ЛР – 8 ч; СРС – 36 ч.

#### **Введение**

Предмет дисциплины динамика ракетного двигателя. Общая характеристика и состав дисциплины. Объем в часах лекционных и практических занятий. Формы промежуточного и заключительного контроля. Рекомендуемая основная и дополнительная литература.

Роль курса в системе знаний инженера-механика. Методические указания по его изучению. Место динамики ракетного двигателя и оценки прочности и устойчивости его конструктивных элементов в процессе разработки комплекса летательного аппарата.

### **Тема 1. Вариационные и приближенные методы расчета силовых конструкций**

Потенциальная энергия деформации упругой системы. Вариационное решение задачи теории упругости в перемещениях. Вариационный принцип Лагранжа.

Приближенные методы решения задач строительной механики. Метод Ритца-Тимошенко. Конечно-разностные методы. Метод конечных элементов.

### **Тема 2. Использование пакета конечно-элементного анализа ANSYS**

Назначение комплектация и основные возможности пакета. Основные этапы решения задачи в ANSYS. Место конечно-элементного анализа при проектировании. Построение геометрической и конечно-элементной моделей, задание граничных условий, решение задачи, анализ результатов. Стандартные форматы обмена графической информации между приложениями.

Решение плоских задач (ПНС, ПДС, осесимметричная). Расчет стержней и балок. Расчет пластин и оболочек. Динамический анализ (гармонический анализ, модальный анализ, анализ переходных процессов). Температурный анализ. Проведение расчетов на устойчивость.

### **Тема 3. Расчет стержневых систем и ферменных конструкций**

Кинематический анализ стержневых систем и ферменных конструкций. Статически определимые и неопределимые стержневые системы. Расчет плоских стержневых систем и пространственных ферм. Расчет статически определимых ферм. Метод вырезания углов. Метод сечений.

### **Тема 4. Расчет пластин**

Основные уравнения и гипотезы. Вывод основных уравнений в декартовой системе координат. Плоское напряженное состояние пластин. Изгиб пластин, основные соотношения. Вывод дифференциального уравнения упругой поверхности пластины. Учет граничных условий. Общее решение дифференциального уравнения для прямоугольной пластины.

### **Тема 5. Расчет оболочек вращения**

Основные понятия и гипотезы Кирхгофа-Лява. Геометрия оболочек вращения. Основные соотношения общей теории оболочек. Вывод геометрических соотношений (уравнений связи деформаций и перемещений).

Безмоментная теория оболочек вращения. Основные уравнения безмоментной теории оболочек. Уравнения осесимметричной задачи. Вычисление напряжений и деформации в сферической и цилиндрической оболочках при действии внутреннего давления.

Основные уравнения моментной теории оболочек. Уравнения моментной теории оболочек при осесимметричной деформации. Краевой эффект для цилиндрической оболочки.

## **Тема 6. Расчет на устойчивость пластин и оболочек**

Понятие об устойчивости. Задача Эйлера. Зависимость критической силы от условий закрепления стержня.

Устойчивость пластин. Устойчивость прямоугольной пластины, шарнирно опертой по контуру и сжатой в одном направлении. Двустороннее сжатие прямоугольной пластины.

Устойчивость цилиндрических оболочек. Устойчивость цилиндрических оболочек при осевом сжатии и внешнем давлении. Устойчивость сферической оболочки при внешнем давлении.

## **Тема 7. Расчет напряженно-деформированного состояния элементов конструкций ракетного двигателя**

Напряжения и деформации в толстостенной трубе (задача Ляме). Расчет напряженно-деформированного состояния прочноскрепленного заряда с гладким цилиндрическим каналом при действии внутреннего давления и температуры эксплуатации.

Расчет корпуса РДТТ. Расчет сферических, эллиптических и торосферических днищ. Расчет шпангоутов. Особенности расчета на прочность конструкций ЖРД.

Расчет конструкций из композиционных материалов.

## **Модуль 2. Динамический анализ ракетного двигателя**

### **Раздел 2. Динамический анализ ракетного двигателя**

Л – 14 ч; ПЗ – 10 ч; ЛР – 10 ч; СРС – 36 ч.

## **Тема 8. Динамические нагрузки, действующие на летательный аппарат**

Понятия динамики и динамической нагрузки. Классификация динамических нагрузок, действующих на летательный аппарат на различных этапах его эксплуатации. Нагрузки при хранении ракетных двигателей. Нагрузка при транспортировке. Ветровая нагрузка. Полетные нагрузки. Тепловые нагрузки. Акустическая нагрузка. Колебания давления в камере РДТТ и тяги двигателя.

## **Тема 9. Определения теории колебаний и механизмы их возникновения в ракетном двигателе летательного аппарата**

Собственные колебания элементов и узлов ракетных двигателей. Вынужденные колебания. Автоколебания и механизм их возникновения. Параметрические колебания. Нелинейные колебания. Механизмы возникновения изгибных и продольных автоколебаний ракеты. Динамические нагрузки, действующие на корпус ракетного двигателя при отсечке двигателя. Периодическая возмущающая сила и возмущающая сила произвольного вида.

## **Тема 10. Задачи динамического анализа ракетного двигателя**

Основные задачи динамического анализа. Методы решения динамических задач. Технические решения на этапе динамического анализа. Динамические подходы к оценке динамической прочности (схема мгновенного разрушения и схема накопления повреждений).

Виды колебаний конструкции летательного аппарата и их опасность. Роль динамического анализа в создании конструкции летательного аппарата.

### **Тема 11. Колебания ракетного двигателя**

Возможные причины возникновения продольных колебаний. Собственные продольные колебания стержня переменной погонной массы и жесткости. Метод последовательных приближений при определении собственных частот и форм колебаний. Вынужденные продольные колебания корпуса ракеты при выключении двигателя. Максимальная продольная растягивающая нагрузка для стыковочных соединений.

### **Тема 12. Расчет напряженно-деформированного состояния ракеты с РДТТ при транспортировке**

Коэффициент динамичности конструкции. Схема решения задачи и итерационная процедура учета подкрепления корпуса РДТТ зарядом твердого топлива. Оценка прочности.

Учет динамических свойств твердого ракетного топлива. Трехмерная постановка задачи о колебаниях прочноскрепленного заряда. Отличия в решении от балочной постановки задачи.

### **Тема 13. Экспериментальные методы исследований динамической прочности ракетных двигателей**

Экспериментальные методы исследования твердых топлив. Динамические испытания ракет. Постановка и задачи динамических испытаний ракет. Параметры, определяемые при динамических испытаниях ракет. Влияние динамических нагрузок на надежность ракет.

### **Тема 14. Расчет камеры сгорания ЖРД, топливных баков и трубопроводов**

Упрощенная методика оценки несущей способности конструктивных элементов сгорания ЖРД, топливных баков и трубопроводов. Оценка устойчивости конструктивных элементов от действия статической и динамической нагрузок. Уточненная методика оценки несущей способности конструктивных элементов сгорания ЖРД, топливных баков и трубопроводов. Методы исследования работоспособности конструктивных элементов.

## **4.3. Перечень тем практических занятий**

Таблица 4.2 – Темы практических занятий

<b>№ п.п.</b>	<b>Номер темы дисциплины</b>	<b>Наименование темы практического занятия</b>
1	2	3
1	3	Расчет стержневых систем и ферменных конструкций – 2 час.
2	4	Расчет пластин – 2 час.
3	5	Расчет оболочек вращения – 2 час.
4	7	Расчет напряженно-деформированного состояния элементов конструкций ракетного двигателя – 2 час.
5	8	Расчет динамических нагрузок ракетного двигателя при старте – 2 час.

1	2	3
6	9	Расчет динамических нагрузок при возникновении колебаний элементов конструкции ракетного двигателя – 2 час.
7	11	Расчет механических динамического НДС топливного заряда – 2 час.
8	12	Расчет переходных отсеков ракеты – 2 час.
9	13	Освоение современных методик оценки динамического состояния ракетного двигателя – 2 час.

#### 4.4 Перечень тем лабораторных работ

Таблица 4.3 – Темы лабораторных работ

№ п.п.	Номер темы дисциплины	Наименование темы лабораторной работы
1	2	Основы работы в ANSYS – 2 час.
2	3	Расчет ферменных конструкций с использованием пакета ANSYS – 2 час.
3	4	Расчет пластин с использованием пакета ANSYS – 2 час.
4	6	Расчет на устойчивость с использованием пакета ANSYS – 2 час.
5	8	Модальный анализ с использованием пакета ANSYS – 2 час.
6	9	Гармонический анализ с использованием пакета ANSYS – 2 час.
7	10	Определение влияния изменения массы топливного заряда на продольные, изгибные и крутильные колебания ракетного двигателя – 2 час.
8	11	Исследование влияния массо-жесткостных характеристик на динамические нагрузки ракетного двигателя – 2 час.
9	12	Исследование динамически напряженных зон в топливном заряде ракетного двигателя – 2 час.

#### 5. 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. Изучение дисциплины осуществляется в течение двух семестров, график изучения дисциплины приводится п.7.

5. 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.

### 5.1 Виды самостоятельной работы студентов

Таблица 5.1 – Виды самостоятельной работы студентов (СРС)

Номер темы дисциплины	Вид самостоятельной работы студентов	Трудоемкость, час.
1	2	3
1	Изучение теоретического материала	4
2	Изучение теоретического материала Подготовка отчётов по лабораторным работам	2 2
3	Изучение теоретического материала Подготовка к практическим занятиям Подготовка отчётов по лабораторным работам	2 2 2
4	Изучение теоретического материала Подготовка к практическим занятиям Подготовка отчётов по лабораторным работам	2 2 2
5	Изучение теоретического материала Подготовка к практическим занятиям	4 2
6	Изучение теоретического материала Подготовка отчётов по лабораторным работам	4 2
7	Изучение теоретического материала Подготовка к практическим занятиям	2 2
8	Изучение теоретического материала Подготовка к практическим занятиям Подготовка отчётов по лабораторным работам	2 2 2
9	Изучение теоретического материала Подготовка к практическим занятиям Подготовка отчётов по лабораторным работам	2 2 2
10	Изучение теоретического материала Подготовка отчётов по лабораторным работам	2 2
11	Изучение теоретического материала Подготовка к практическим занятиям Подготовка отчётов по лабораторным работам	2 2 2
12	Изучение теоретического материала Подготовка к практическим занятиям Подготовка отчётов по лабораторным работам	2 2 2
13	Изучение теоретического материала Подготовка к практическим занятиям	2 2
14	Изучение теоретического материала	4
	<b>Итого час./ ЗЕ</b>	<b>72/2</b>

### 5.1.1 Изучение теоретического материала

Тематика вопросов, изучаемых самостоятельно:

Тема 1. Вариационные и приближенные методы расчета силовых конструкций

Потенциальная энергия деформации упругой системы. Вариационное решение задачи теории упругости в перемещениях. Вариационный принцип Лагранжа.

Приближенные методы решения задач строительной механики. Метод Ритца-Тимошенко. Конечно-разностные методы. Метод конечных элементов.

Тема 2. Использование пакета конечно-элементного анализа ANSYS

Назначение комплекта и основные возможности пакета. Основные этапы решения задачи в ANSYS. Место конечно-элементного анализа при проектировании. Построение геометрической и конечно-элементной моделей, задание граничных условий, решение задачи, анализ результатов. Стандартные форматы обмена графической информации между приложениями.

Решение плоских задач (ПНС, ПДС, осесимметричная). Расчет стержней и балок. Расчет пластин и оболочек. Динамический анализ (гармонический анализ, модальный анализ, анализ переходных процессов). Температурный анализ. Проведение расчетов на устойчивость.

Тема 3. Расчет стержневых систем и ферменных конструкций

Кинематический анализ стержневых систем и ферменных конструкций. Статически определимые и неопределимые стержневые системы. Расчет плоских стержневых систем и пространственных ферм. Расчет статически определимых ферм. Метод вырезания углов. Метод сечений.

Тема 4. Расчет пластин

Основные уравнения и гипотезы. Вывод основных уравнений в декартовой системе координат. Плоское напряженное состояние пластин. Изгиб пластин, основные соотношения. Вывод дифференциального уравнения упругой поверхности пластины. Учет граничных условий. Общее решение дифференциального уравнения для прямоугольной пластины.

Тема 5. Расчет оболочек вращения

Основные понятия и гипотезы Кирхгофа-Лява. Геометрия оболочек вращения. Основные соотношения общей теории оболочек. Вывод геометрических соотношений (уравнений связи деформаций и перемещений).

Безмоментная теория оболочек вращения. Основные уравнения безмоментной теории оболочек. Уравнения осесимметричной задачи. Вычисление напряжений и деформации в сферической и цилиндрической оболочках при действии внутреннего давления.

Основные уравнения моментной теории оболочек. Уравнения моментной теории оболочек при осесимметричной деформации. Краевой эффект для цилиндрической оболочки.

Тема 6. Расчет на устойчивость пластин и оболочек

Понятие об устойчивости. Задача Эйлера. Зависимость критической силы от условий закрепления стержня.

Устойчивость пластин. Устойчивость прямоугольной пластины, шарнирно опертой по контуру и сжатой в одном направлении. Двустороннее сжатие прямоугольной пластины.

Устойчивость цилиндрических оболочек. Устойчивость цилиндрических оболочек при осевом сжатии и внешнем давлении. Устойчивость сферической оболочки при внешнем давлении.

Тема 7. Расчет напряженно-деформированного состояния элементов конструкций ракетного двигателя

Напряжения и деформации в толстостенной трубе (задача Ляме). Расчет напряженно-деформированного состояния прочноскрепленного заряда с гладким цилиндрическим каналом при действии внутреннего давления и температуры эксплуатации.

Расчет корпуса РДТТ. Расчет сферических, эллиптических и торосферических днищ. Расчет шпангоутов. Особенности расчета на прочность конструкций ЖРД.

Расчет конструкций из композиционных материалов.

Тема 8. Динамические нагрузки, действующие на летательный аппарат

Понятия динамики и динамической нагрузки. Классификация динамических нагрузок, действующих на летательный аппарат на различных этапах его эксплуатации. Нагрузки при хранении ракетных двигателей. Нагрузка при транспортировке. Ветровая нагрузка. Полетные нагрузки. Тепловые нагрузки. Акустическая нагрузка. Колебания давления в камере РДТТ и тяги двигателя.

Тема 9. Определения теории колебаний и механизмы их возникновения в ракетном двигателе летательного аппарата

Собственные колебания элементов и узлов ракетных двигателей. Вынужденные колебания. Автоколебания и механизм их возникновения. Параметрические колебания. Нелинейные колебания. Механизмы возникновения изгибных и продольных автоколебаний ракеты. Динамические нагрузки, действующие на корпус ракетного двигателя при отсечке двигателя. Периодическая возмущающая сила и возмущающая сила произвольного вида.

Тема 10. Задачи динамического анализа ракетного двигателя

Основные задачи динамического анализа. Методы решения динамических задач. Технические решения на этапе динамического анализа. Динамические подходы к оценке динамической прочности (схема мгновенного разрушения и схема накопления повреждений).

Виды колебаний конструкции летательного аппарата и их опасность. Роль динамического анализа в создании конструкции летательного аппарата.

Тема 11. Колебания ракетного двигателя

Возможные причины возникновения продольных колебаний. Собственные продольные колебания стержня переменной погонной массы и жесткости. Метод последовательных приближений при определении собственных частот и форм колебаний. Вынужденные продольные колебания корпуса ракеты при выключении двигателя. Максимальная продольная растягивающая нагрузка для стыковочных соединений.

Тема 12. Расчет напряженно-деформированного состояния ракеты с РДТТ при транспортировке

Коэффициент динамичности конструкции. Схема решения задачи и итерационная процедура учета подкрепления корпуса РДТТ зарядом твердого топлива. Оценка прочности.

Учет динамических свойств твердого ракетного топлива. Трехмерная постановка задачи о колебаниях прочно скрепленного заряда. Отличия в решении от балочной постановки задачи.

Тема 13. Экспериментальные методы исследований динамической прочности ракетных двигателей

Экспериментальные методы исследования твердых топлив. Динамические испытания ракет. Постановка и задачи динамических испытаний ракет. Параметры,



определяемые при динамических испытаниях ракет. Влияние динамических нагрузок на надежность ракет.

Тема 14. Расчет камеры сгорания ЖРД, топливных баков и трубопроводов

Упрощенная методика оценки несущей способности конструктивных элементов сгорания ЖРД, топливных баков и трубопроводов. Оценка устойчивости конструктивных элементов от действия статической и динамической нагрузок. Уточненная методика оценки несущей способности конструктивных элементов сгорания ЖРД, топливных баков и трубопроводов. Методы исследования работоспособности конструктивных элементов.

### **5.1.2 Курсовой проект (курсовая работа)**

Не предусмотрены.

### **5.1.3 Реферат**

Не предусмотрен.

### **5.1.4 Расчетно-графические работы**

Не предусмотрены.

### **5.1.5 Индивидуальные задания**

Не предусмотрены.

## **5.2 Образовательные технологии, используемые для формирования компетенций**

Проведение лекционных занятий по дисциплине основывается на активном методе обучения, при которой учащиеся не пассивные слушатели, а активные участники занятия, отвечающие на вопросы преподавателя. Вопросы преподавателя нацелены на активизацию процессов усвоения материала. Преподаватель заранее намечает список вопросов, стимулирующих ассоциативное мышление и установления связей с ранее освоенным материалом.

Практические занятия проводятся на основе реализации метода обучения действием: определяются проблемные области; формируются группы (команды); каждое практическое занятие проводится по своему алгоритму. При проведении практических занятий преследуются следующие цели: применение знаний отдельных дисциплин и креативных методов для решения технических и научных проблем в энергомашиностроении; отработка навыков взаимодействия в микроколлективе; закрепление основ теоретических знаний с позиций решения актуальной задачи энергомашиностроения; развитие творческих навыков по управлению инновациями через разработку и реализацию научных проектов.

Лабораторные работы проводятся на экспериментальных установках кафедры с элементами деловой игры и формирования ситуационных задач. Проведение лабораторных занятий основывается на интерактивном методе обучения, при котором учащиеся 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 учащихся на достижение целей занятия.

## 6 Фонд оценочных средств дисциплины

### 6.1 Текущий контроль освоения заданных дисциплинарных частей компетенций

Текущий контроль освоения дисциплинарных частей компетенций проводится в следующих формах:

- опрос, текущая контрольная работа для анализа усвоения материала предыдущей лекции;
- оценка работы студента на лекционных, лабораторных работах и практических занятиях в рамках рейтинговой системы;
- оценка выполнения практической работы в соответствии с заданием практического занятия.

### 6.2 Рубежный и промежуточный контроль освоения заданных дисциплинарных частей компетенций

Рубежный контроль освоения дисциплинарных компетенций проводится по окончании модулей дисциплины в следующих формах:

- контрольные работы (модуль 1, 2);
- защита отчётов по лабораторным работам (модуль 1,2).

### 6.3 Итоговый контроль освоения заданных дисциплинарных частей компетенций

#### 1) Зачёт

Зачет по дисциплине выставляется по итогам проведенного промежуточного контроля и при выполнении заданий всех практических занятий.

#### 2) Экзамен

Не предусмотрен.

Фонды оценочных средств, включающие типовые задания, контрольные работы и методы оценки, критерии оценивания, перечень контрольных точек и таблицу планирования результатов обучения, позволяющие оценить результаты освоения данной дисциплины, входят в состав РПД в виде приложения.

### 6.4 Виды текущего, рубежного и итогового контроля освоения элементов и частей компетенций

Таблица 6.1 – Виды контроля освоения элементов и частей компетенций

Контролируемые результаты освоения дисциплины (ЗУВы)	Вид контроля				
	ТК	КР	ПЗ	ЛР	Зачет
<b>Знает:</b> – методы расчетов на прочность и жесткость различных конструкций;	+	+			ТВ
– методы выбора расчетных схем прочности и жесткости конструкций ракетных двигателей и их подсистем;	+	+	+	+	ТВ
– природу колебательных процессов, виды и структуру колебательных процессов и волновых взаимодействий;	+	+	+	+	ТВ

Контролируемые результаты освоения дисциплины (ЗУВы)	Вид контроля				
	ТК	КР	ПЗ	ЛР	Зачет
– математический аппарат, описывающий колебательные движения в механике, преобразования Лапласа, Фурье, функции Бесселя и Неймана; системы координат и преобразования систем координат;	+	+	+	+	ТВ
– физические уравнения связей в конструкции объекта в зависимости от количества степеней свободы рассматриваемого соединения или объекта;	+	+	+	+	ТВ
– методы расчета на прочность, устойчивость конструктивных элементов объекта, балок с учетом внешних сил и моментов;	+	+	+	+	ТВ
– основы динамического поведения элементной базы ракетного двигателя;	+	+	+	+	ТВ
– влияние на динамические нагрузки конструкции ракетного двигателя;	+	+	+	+	ТВ
<b>Умеет:</b> – составлять расчетные схемы определения динамических нагрузок для конструктивного элемента объекта с постановкой начальных и граничных условий;		+	+	+	КЗ
– выбирать методы и приемы расчетов на прочность, устойчивость конструктивных элементов ракетного двигателя;		+	+	+	КЗ
– определять расчетные напряжения и деформации с анализом динамического состояния и действия нагрузок в конструктивных элементах ракетного двигателя;		+	+	+	КЗ
– использовать методики расчета на прочность и устойчивость элементов конструкций ракет и космических аппаратов с применением программ конечно-элементного анализа;		+	+	+	КЗ
– проводить исследования физических и прочностных свойств материалов;		+	+	+	КЗ
<b>Владеет:</b> – навыками определения основных расчетных нагрузок, действующих на конструктивные элементы и узлы ракетного двигателя;			+	+	КЗ
– навыками проведения прочностных расчетов с учетом действия динамических нагрузок;			+	+	КЗ
– навыками работы с технической литературой с проведением анализа по выбору методик расчета прочностных характеристик и устойчивости конструктивных элементов.			+	+	КЗ

Примечание:

ТК – текущий контроль знаний по теме (опрос);

КР – рубежная контрольная работа по модулю (оценка знаний);

ЛР – выполнение лабораторных работ с подготовкой отчёта (оценка умений);  
 ПЗ – выполнение практических занятий с подготовкой и защитой отчёта (оценка владения);  
 ТВ – теоретический вопрос; КЗ – комплексное задание экзамена.

### 7 График учебного процесса по дисциплине

Таблица 7.1 – График учебного процесса по дисциплине

Вид работы	Распределение часов по учебным неделям																		Итого
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
<b>Раздел:</b>	<b>Р1</b>									<b>Р2</b>									
Лекции	2	2	2	2	2	2	2	2		2	2	2	2	2	2	2	2		32
Практ. занятия	2		2		2		2		2		2		2		2		2		18
Лаборат. работы		2		2		2		2		2		2		2		2		2	18
КСР									2									2	4
Изучение теор. мат.	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	36
Подготовка к практ. зан.	2		2		2		2		2		2		2		2		2		18
Подгот. отчетов по ЛР		2		2		2		2		2		2		2		2		2	18
<b>Модуль:</b>	<b>М1</b>									<b>М2</b>									<b>144</b>
Контрольные работы									+									+	
Дисциплин. контроль																			<b>Зачет</b>

## 8 Перечень учебно-методического и информационного обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине

### 8.1. Карта обеспеченности дисциплины учебно-методической литературой

**Б1.Б.30**  
**Динамика и прочность ракетных двигателей**

(индекс и полное название дисциплины)

#### Блок 1. Дисциплины (модули)

(блок дисциплины)

базовая часть блока

вариативная часть блока

обязательная

по выбору студента

**24.05.02**

(код направления/  
специальности)

**«Проектирование авиационных и ракетных двигателей»,  
специализация «Проектирование ракетных  
двигателей твердого топлива»**

(полное название направления подготовки / специальности)

**АРД / РД**

(аббревиатура направления/  
специальности)

Уровень  
подготовки

специалист

бакалавр

магистр

Форма  
обучения

очная

заочная

очно-заочная

**2017**

год утверждения  
учебного плана ООП

Семестр(ы)

**9**

Количество групп

**1**

Количество студентов

**25**

**Сальников Алексей Федорович**

(фамилия, инициалы преподавателя)

**профессор**

(должность)

**Аэрокосмический**

(факультет)

**РКТЭС**

(кафедра)

**2-39-17-10**

(контактная информация)

**8.2. Перечень основной и дополнительной учебной литературы,  
необходимой для освоения дисциплины**

№	<b>Библиографическое описание</b> <i>(автор, заглавие, вид издания, место, издательство, год издания, количество страниц)</i>	<b>Количество экземпляров в библиотеке</b>
<b>1. Основная литература</b>		
1	Присняков В.Ф. Динамика ракетных двигателей твердого топлива: учебное пособие для вузов / Под ред. В.Ф. Уткина. – М.: Машиностроение, 1984. – 248 с.	39
2	Дарков А.Л., Шапошников Н.Н. Строительная механика. Учебное пособие. Санкт-Петербург: ЛАНЬ, 2010, 2014. – 655 с.	37 + ЭБС "Лань"
<b>2 Дополнительная литература</b>		
<b>2.1 Учебные и научные издания</b>		
1	Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. ANSYS для инженеров. М.: Машиностроение, 2004. – 512 с.	44
2	Котов А.Г. САПР изделий из композиционных материалов. Моделирование процессов деформирования и разрушения в среде ANSYS, 2008. – 350 с.	150 + ЭБ ПНИПУ
3	Яцун С.Ф., Мищенко В.Я., Политов Е.Н. Кинематика, динамика и прочность машин, приборов и аппаратуры: учебное пособие для вузов/ – Москва: Альфа-М: ИНФРА-М: Уником Сервис, 2012. – 207 с	2
4	Динамика ракет: учебник для вузов / А. К. Абгарян [и др.]; Под ред. В.П. Мишина. – М.: Машиностроение, 1990. – 264 с.	22
<b>2.2 Периодические издания</b>		
	Не предусмотрены	
<b>2.3 Нормативно-технические издания</b>		
	Не предусмотрены	
<b>2.4 Официальные издания</b>		
	Не предусмотрены	
<b>2.5 Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины</b>		
1	Электронная библиотека Научной библиотеки Пермского национального исследовательского политехнического университета [Электронный ресурс: полнотекстовая база данных электрон. документов изданных в Изд-ве ПНИПУ]. – Электрон. дан. (1 912 записей). – Пермь, 2014. – Режим доступа: <a href="http://elib.pstu.ru/">http://elib.pstu.ru/</a> . – Загл. с экрана.	
2	Электронно-библиотечная система Издательство «Лань» [Электронный ресурс]: [полнотекстовая база данных: электрон. версии кн., журн. по гуманит., обществ., естеств. и техн. наукам] / Электрон.-библ. система «Изд-ва «Лань». – Санкт-Петербург, 2010-2016. – Режим доступа: <a href="http://e.lanbook.com">http://e.lanbook.com</a> , по IP-адресам компьютер. сети Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. – Загл. с экрана.	

**Основные данные об обеспеченности на**

06.06.2017

*(дата одобрения рабочей программы на заседании кафедры)*

основная литература

обеспечена

не обеспечена

дополнительная литература

обеспечена

не обеспечена

Зав. отделом комплектования  
научной библиотеки

Н.В. Тюрикова

**Данные об обеспеченности на***(дата составления рабочей программы)*

основная литература

обеспечена

не обеспечена

дополнительная литература

обеспечена

не обеспечена

Зав. отделом комплектования  
научной библиотеки

Н.В. Тюрикова

**8.3 Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине****8.3.1 Перечень программного обеспечения, в том числе компьютерные обучающие и контролирующие программы**

№ п/п	Вид учебного занятия	Наименование программного продукта	Рег. номер	Назначение
1	Лабораторные работы и практические занятия	Mathcad 14 University Classroom	SE14RYMMEV0002-FLEX	Решение задач теории упругости
2	Лабораторные работы	ANSYS, ANSYS Workbench	лиц. дог 444632	Расчет на прочность и устойчивость элементов конструкций

**8.4 Аудио- и видео-пособия**

Не предусмотрены

## 9 Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине

### 9.1 Специализированные лаборатории и классы

Таблица 9.1 – Специализированные лаборатории и классы

№ п/п	Помещения			Площадь, м <sup>2</sup>	Количество посадочных мест
	Название	Принадлежность (кафедра)	Номер аудитории		
1	Лаборатория испытаний кафедры РКТЭС	РКТЭС	010 к.Д АКФ	36	12
2	Компьютерный класс	РКТЭС	314 к.Д АКФ	72	12

### 9.2. Основное учебное оборудование

Таблица 9.2 – Учебное оборудование

№ п/п.	Наименование и марка оборудования (стенда, макета, плаката)	Кол-во, ед.	Форма владения, пользования (собственность, оперативное управление, аренда и т.п.)	Номер аудитории
1	Компьютеры	12	Оперативное управление	314 к.Д АКФ



### Лист регистрации изменений

№ п/п	Содержание изменения	Дата, номер протокола заседания кафедры. Подпись заведующего кафедрой
1	2	3
1		
2		
3		
4		
5		
6		