

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



**Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет**

**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по образовательной  
деятельности

 А.Б. Петроченков

« 06 » марта 20 23 г.

### **РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

**Дисциплина:** Современные численные методы в научных исследованиях  
(наименование)

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

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

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

**Направление подготовки:** 24.04.05 Двигатели летательных аппаратов  
(код и наименование направления)

**Направленность:** Аэродинамика, гидродинамика и процессы теплообмена  
двигателей летательных аппаратов  
(наименование образовательной программы)

## 1. Общие положения

### 1.1. Цели и задачи дисциплины

Цель – ознакомление с численными методами, используемыми в современных вычислительных программах для моделирования рабочих процессов в ракетных двигателях.

Задачи дисциплины:

- изучение основ метода конечных элементов и его использование для исследования процессов в ракетных двигателях;
- получение навыков моделирования рабочих процессов в ракетных двигателях с использованием метода конечных элементов.

### 1.2. Изучаемые объекты дисциплины

– метод конечных элементов.

### 1.3. Входные требования

Не предусмотрены

## 2. Планируемые результаты обучения по дисциплине

Компетенция	Индекс индикатора	Планируемые результаты обучения по дисциплине (знать, уметь, владеть)	Индикатор достижения компетенции, с которым соотнесены планируемые результаты обучения	Средства оценки
ПК-1.1	ИД-1ПК-1.1	Знает основы метода конечных элементов для моделирования рабочих процессов в ракетных двигателях.	Знает теоретические основы рабочих процессов в ракетных двигателях.	Дифференцированный зачет
ПК-1.1	ИД-2ПК-1.1	Умеет использовать метод конечных элементов для моделирования рабочих процессов в ракетных двигателях и их агрегатах.	Умеет пользоваться современными вычислительными пакетами для моделирования рабочих процессов в ракетных двигателях и их агрегатах.	Дифференцированный зачет
ПК-1.1	ИД-3ПК-1.1	Владеет навыками использования метода конечных элементов при решении статических и динамических задач, определения собственных частот и форм колебаний элементов конструкции ракетных двигателей.	Владеет навыками постановки исследовательских задач, планирования и проведения вычислений, анализа и обобщения результатов моделирования при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ при проектировании ракетных двигателей.	Защита лабораторной работы

### 3. Объем и виды учебной работы

Вид учебной работы	Всего часов	Распределение по семестрам в часах	
		Номер семестра	
		4	
1. Проведение учебных занятий (включая проведение текущего контроля успеваемости) в форме:	72	72	
1.1. Контактная аудиторная работа, из них:			
- лекции (Л)	36	36	
- лабораторные работы (ЛР)	32	32	
- практические занятия, семинары и (или) другие виды занятий семинарского типа (ПЗ)			
- контроль самостоятельной работы (КСР)	4	4	
- контрольная работа			
1.2. Самостоятельная работа студентов (СРС)	108	108	
2. Промежуточная аттестация			
Экзамен			
Дифференцированный зачет	9	9	
Зачет			
Курсовой проект (КП)			
Курсовая работа (КР)			
Общая трудоемкость дисциплины	180	180	

### 4. Содержание дисциплины

Наименование разделов дисциплины с кратким содержанием	Объем аудиторных занятий по видам в часах			Объем внеаудиторных занятий по видам в часах
	Л	ЛР	ПЗ	СРС
4-й семестр				
Основы метода конечных элементов.	4	0	0	4
Введение. История развития метода конечных элементов (МКЭ). Основные концепции МКЭ. Сравнение характеристик МКЭ и метода конечных разностей. Тема 1. Конечные элементы. Дискретизация области исследования (одномерные и двумерные элементы). Одномерный симплекс-элемент. Получение функций формы. Свойства функций формы. Естественные координаты. Вывод функций формы для линейного и квадратичного одномерного элементов. Треугольный конечный элемент. L-координаты треугольного элемента. Вывод функций формы для линейного и квадратичного треугольных элементов. Четырехугольные конечные элементы. Трехмерные конечные элементы.				

Наименование разделов дисциплины с кратким содержанием	Объем аудиторных занятий по видам в часах			Объем внеаудиторных занятий по видам в часах
	Л	ЛР	ПЗ	СРС
Метод конечных элементов в задачах теории упругости	10	10	0	32
<p>Тема 2. Математические модели решения задач теории упругости.  Одномерная модель. Плоское напряженное состояние. Плоское деформированное состояние. Обобщенная плоская деформация. Осесимметричные модели. Трехмерное напряженно-деформированное состояние (НДС).</p> <p>Тема 3. Применение МКЭ для модели плоского напряженного состояния.  Запись основных соотношений теории упругости для конечного элемента в матричной форме. Вычисление производных функций формы. Матрица Якоби. Математическая постановка МКЭ. Основные этапы решения задачи МКЭ.</p> <p>Тема 4. Вариационный принцип Германна.  Функция среднего напряжения. Связь напряжений и деформаций с функцией среднего напряжения. Вывод основного соотношения вариационного принципа Германна.</p> <p>Тема 5. Численная реализация МКЭ.  Построение конечно-элементной модели конструкции. Формирование матрицы конечного элемента. Применение численного интегрирования при определении матрицы элементов. Формирование глобальной матрицы системы уравнений МКЭ. Организация хранения глобальной матрицы системы уравнений МКЭ. Учет граничных условий при решении систем уравнений МКЭ.  Методы решения систем линейных алгебраических уравнений. Вычисление деформаций и напряжений.</p>				
Метод конечных элементов в задачах динамики	8	8	0	32
<p>Тема 6. Проведение модального анализа.  Уравнение свободных колебаний в матричной форме. Решение собственной задачи. Матрица масс конечного элемента. Получение матрицы масс для одномерного и треугольного симплекс-элементов. Определение собственных частот и собственных форм колебаний конструкции.</p> <p>Тема 7. Проведение гармонического анализа.  Вынужденные колебания. Учет вязкоупругих свойств материалов. Метод соответствия.</p> <p>Тема 8. Расчет динамического НДС при действии нагрузки произвольного вида. Методы прямого интегрирования (метод центральных разностей).</p>				
Метод конечных элементов в задачах акустики	14	14	0	40
Тема 9. Вывод уравнений для элементов с				

Наименование разделов дисциплины с кратким содержанием	Объем аудиторных занятий по видам в часах			Объем внеаудиторных занятий по видам в часах
	Л	ЛР	ПЗ	СРС
<p>помощью метода Галеркина.  Метод Галеркина. Одномерные уравнения теории поля. Использование метода Галеркина для решения задачи Коши для обыкновенного дифференциального уравнения.  Тема 10. Метод конечных элементов для уравнений с частными производными.  Двумерные уравнения теории поля. Решение краевых задач с помощью метода конечных элементов.  Использование метода Галеркина для решения системы дифференциальных уравнений первого порядка.  Тема 11. Использование метода Галеркина для решения конвективного волнового уравнения.  Одномерные уравнения теории поля на примере уравнения Гельмгольца. Аппроксимация решения.  Вывод разрешающих уравнений МКЭ.  Использование метода Галеркина для решения двумерного конвективного волнового уравнения.  Аппроксимация решения. Вывод разрешающих уравнений МКЭ.</p>				
ИТОГО по 4-му семестру	36	32	0	108
ИТОГО по дисциплине	36	32	0	108

### Тематика примерных лабораторных работ

№ п.п.	Наименование темы лабораторной работы
1	Применение МКЭ для стержня при действии осевой перегрузки с использованием линейного и квадратичного одномерных конечных элементов.
2	Применение МКЭ для решения задачи поперечного изгиба балки.
3	Применение МКЭ для определения напряженно-деформированного состояния (НДС) прочноскрепленного заряда с гладким цилиндрическим каналом при действии внутреннего давления.
4	Применение вариационного принципа Германна для определения НДС прочноскрепленного заряда с гладким цилиндрическим каналом при действии внутреннего давления.
5	Определение продольных собственных частот и форм колебаний стержня.
6	Определение собственных частот и форм изгибных колебаний стержня.
7	Определение собственных частот и форм радиальных механических колебаний прочноскрепленного заряда с гладким цилиндрическим каналом.
8	Проведение гармонического анализа для прочноскрепленного заряда с гладким цилиндрическим каналом при действии внутреннего осциллирующего давления с учетом вязкоупругих свойств твердого ракетного топлива.
9	Определение НДС прочноскрепленного заряда с гладким цилиндрическим каналом при выходе двигателя на режим.

№ п.п.	Наименование темы лабораторной работы
10	Использование метода Галеркина для решения задачи Коши для обыкновенного дифференциального уравнения.
11	Использование метода Галеркина для решения системы дифференциальных уравнений первого порядка.
12	Аналитическое и конечно-элементное решения одномерного конвективного волнового уравнения.

## 5. Организационно-педагогические условия

### 5.1. Образовательные технологии, используемые для формирования компетенций

<p>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, а также на развитие логического мышления. Преподаватель заранее намечает список вопросов, стимулирующих ассоциативное мышление и установления связей с ранее освоенным материалом.</p> <p>Проведение лабораторных занятий основывается на интерактивном методе обучения, при котором обучающиеся взаимодействуют не только с преподавателем, но и друг с другом. При этом доминирует активность учащихся в процессе обучения. Место преподавателя в интерактивных занятиях сводится к направлению деятельности обучающихся на достижение целей занятия.</p> <p>При проведении учебных занятий используются интерактивные лекции, групповые дискуссии, тренинги и анализ ситуаций и имитационных моделей.</p>
---

### 5.2. Методические указания для обучающихся по изучению дисциплины

<p>При изучении дисциплины обучающимся целесообразно выполнять следующие рекомендации:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Изучение учебной дисциплины должно вестись систематически.</li> <li>2. После изучения какого-либо раздела по учебнику или конспектным материалам рекомендуется по памяти воспроизвести основные термины, определения, понятия раздела.</li> <li>3. Особое внимание следует уделить выполнению отчетов по лабораторным работам и индивидуальным комплексным заданиям на самостоятельную работу.</li> <li>4. Вся тематика вопросов, изучаемых самостоятельно, задается на лекциях преподавателем. Им же даются источники (в первую очередь вновь изданные в периодической научной литературе) для более детального понимания вопросов, озвученных на лекции.</li> </ol>
--

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

### 6.1. Печатная учебно-методическая литература

№ п/п	Библиографическое описание (автор, заглавие, вид издания, место, издательство, год издания, количество страниц)	Количество экземпляров в библиотеке
<b>1. Основная литература</b>		
1	Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы : пер. с англ. / Р. Галлагер. - Москва: Мир, 1984.	19

2	Зенкевич О. Конечные элементы и аппроксимация : пер. с англ. / О. Зенкевич, К. Морган. - Москва: Мир, 1986.	13
3	Сегерлинд Л. Д. Применение метода конечных элементов : пер. с англ. / Л. Д. Сегерлинд. - Москва: Мир, 1979.	12
<b>2. Дополнительная литература</b>		
<b>2.1. Учебные и научные издания</b>		
1	Завадский В. Ю. Метод конечных разностей в волновых задачах акустики / В. Ю. Завадский. - Москва: Наука, 1982.	6
2	Метод конечных элементов : учебное пособие для втузов / П. М. Варвак [и др.]. - Киев: Вища шк., 1981.	15
<b>2.2. Периодические издания</b>		
1	Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника / Пермский национальный исследовательский политехнический университет ; Под ред. В. Ю. Петрова ; Р. В. Бульбовича. - Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2012 -.	
<b>2.3. Нормативно-технические издания</b>		
	Не используется	
<b>3. Методические указания для студентов по освоению дисциплины</b>		
	Не используется	
<b>4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студента</b>		
	Не используется	

## 6.2. Электронная учебно-методическая литература

Вид литературы	Наименование разработки	Ссылка на информационный ресурс	Доступность (сеть Интернет / локальная сеть; авторизованный / свободный доступ)
Дополнительная литература	Зенкевич О. Конечные элементы и аппроксимация : пер. с англ. / О. Зенкевич, К. Морган. - Москва: Мир, 1986.	<a href="http://elib.pstu.ru/Record/RUPNRPUelib2492">http://elib.pstu.ru/Record/RUPNRPUelib2492</a>	локальная сеть; авторизованный доступ
Дополнительная литература	Зенкевич О. Метод конечных элементов в теории сооружений и в механике сплошных сред : пер. с англ. / О. Зенкевич, И. Чанг. - Москва: Недра, 1974.	<a href="http://elib.pstu.ru/Record/RUPNRPUelib3628">http://elib.pstu.ru/Record/RUPNRPUelib3628</a>	локальная сеть; авторизованный доступ
Основная литература	Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы : пер. с англ. / Р. Галлагер. - Москва: Мир, 1984.	<a href="http://elib.pstu.ru/vufind/Record/RUPNRPUelib2508">http://elib.pstu.ru/vufind/Record/RUPNRPUelib2508</a>	локальная сеть; авторизованный доступ
Основная литература	Зенкевич О. К. Метод конечных элементов в технике : пер. с англ. / О. К. Зенкевич. - Москва: Мир, 1975.	<a href="http://elib.pstu.ru/Record/RUPNRPUelib2087">http://elib.pstu.ru/Record/RUPNRPUelib2087</a>	локальная сеть; авторизованный доступ
Основная литература	Сегерлинд Л. Д. Применение метода конечных элементов : пер. с англ. / Л. Д. Сегерлинд. - Москва: Мир, 1979.	<a href="http://elib.pstu.ru/vufind/Record/RUPNRPUelib2168">http://elib.pstu.ru/vufind/Record/RUPNRPUelib2168</a>	локальная сеть; авторизованный доступ

### **6.3. Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение, используемое при осуществлении образовательного процесса по дисциплине**

Вид ПО	Наименование ПО
Операционные системы	Windows 10 (подп. Azure Dev Tools for Teaching)
Офисные приложения.	Microsoft Office Professional 2007. лиц. 42661567
Прикладное программное обеспечение общего назначения	Dr.Web Enterprise Security Suite, 3000 лиц, ПНИПУ ОЦНИТ 2017
Прикладное программное обеспечение общего назначения	MATHCAD 14 Academic, ПНИПУ 2009 г.
Среды разработки, тестирования и отладки	Microsoft Visual Studio (подп. Azure Dev Tools for Teaching )

### **6.4. Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы, используемые при осуществлении образовательного процесса по дисциплине**

Наименование	Ссылка на информационный ресурс
База данных Scopus	<a href="https://www.scopus.com/">https://www.scopus.com/</a>
База данных Web of Science	<a href="http://www.webofscience.com/">http://www.webofscience.com/</a>
База данных научной электронной библиотеки (eLIBRARY.RU)	<a href="https://elibrary.ru/">https://elibrary.ru/</a>
Научная библиотека Пермского национального исследовательского политехнического университета	<a href="http://lib.pstu.ru/">http://lib.pstu.ru/</a>
Электронно-библиотечная система Лань	<a href="https://e.lanbook.com/">https://e.lanbook.com/</a>
Электронно-библиотечная система IPRbooks	<a href="http://www.iprbookshop.ru/">http://www.iprbookshop.ru/</a>
Информационные ресурсы Сети КонсультантПлюс	<a href="http://www.consultant.ru/">http://www.consultant.ru/</a>

### **7. Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине**

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

### **8. Фонд оценочных средств дисциплины**

Описан в отдельном документе
------------------------------

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

**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ**

для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине  
**«Современные численные методы в научных исследованиях»**  
*Приложение к рабочей программе дисциплины*

<b>Направление подготовки</b>	<u>24.04.05 Двигатели летательных аппаратов</u>
<b>Направленность (профиль) образовательной программы:</b>	<u>Аэродинамика, гидродинамика и процессы теплообмена двигателей летательных аппаратов</u>
<b>Квалификация выпускника:</b>	<u>магистр</u>
<b>Выпускающая кафедра:</b>	<u>Ракетно-космическая техника и энергетические системы</u>
<b>Форма обучения:</b>	<u>очная</u>

**Курс:** 2

**Семестр(ы):** 4

**Трудоемкость:**

Кредитов по рабочему учебному плану:

5

Часов по рабочему учебному плану:

180

**Форма промежуточной аттестации:**

Дифф. зачет: 4 семестр

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

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

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

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

Таблица 1.1. Перечень контролируемых результатов обучения по дисциплине

Контролируемые результаты обучения по дисциплине (ЗУВы)	Вид контроля				
	текущий		рубежный		итоговый
	С	ТО	ОЛР	Т/КР	дифф. зачет
<b>Усвоенные знания</b>					
<b>З.1.</b> Знает основы метода конечных элементов для моделирования рабочих процессов в двигателях летательных аппаратов.		<i>ТО1</i>		<i>КР1</i>	<i>ТВ</i>
<b>Освоенные умения</b>					
<b>У.1</b> Умеет использовать метод конечных элементов для моделирования рабочих процессов в двигателях летательных аппаратов и их агрегатах.			<i>ОЛР1-ОЛР12</i>		<i>ПЗ</i>
<b>Приобретенные владения</b>					
<b>В.1.</b> Владеет навыками использования метода конечных элементов при решении статических и динамических задач, определения собственных частот и форм колебаний элементов конструкции двигателей летательных аппаратов.			<i>ОЛР1-ОЛР12</i>		<i>КЗ</i>

*С* – собеседование по теме; *ТО* – коллоквиум (теоретический опрос); *ОЛР* – отчет по лабораторной работе; *ИЗ* – индивидуальное задание; *Т/КР* – рубежное тестирование (контрольная работа); *РР* – расчётная работа; *ТВ* – теоретический вопрос; *ПЗ* – практическое задание; *КЗ* – комплексное задание экзамена.

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

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

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

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

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

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

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

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

– контроль остаточных знаний.

### **2.1. Текущий контроль усвоения материала**

Текущий контроль усвоения материала в форме собеседования или выборочного теоретического опроса студентов проводится по каждой теме. Результаты по 4-балльной шкале оценивания заносятся в книжку преподавателя и учитываются в виде интегральной оценки при проведении промежуточной аттестации.

### **2.2. Рубежный контроль**

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

#### **2.2.1. Защита лабораторных работ**

Всего запланировано 12 лабораторных работ. Типовые темы лабораторных работ приведены в РПД.

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

### **2.2.2. Рубежная контрольная работа**

Согласно РПД запланировано 4 рубежные контрольные работы (КР) после освоения студентами учебных модулей дисциплины. Первая КР по модулю 1 «Основы метода конечных элементов», вторая КР – по модулю 2 «Метод конечных элементов в задачах теории упругости», третья КР – по модулю 3 «Метод конечных элементов в задачах динамики», четвертая КР – по модулю 4 «Метод конечных элементов в задачах акустики».

#### **Типовые задания первой КР:**

1. Вывести функции формы для квадратичного одномерного элемента.
2. Вывести функции формы для квадратичного треугольного конечного элемента.

#### **Типовые задания второй КР:**

1. Решить задачу для стержня при действии осевой перегрузки методом конечных элементов с использованием квадратичного одномерного конечного элемента.
2. Применить МКЭ для решения задачи поперечного изгиба балки.

#### **Типовые задания третьей КР:**

1. Определить продольные собственные частоты и формы колебаний стержня с использованием МКЭ.
2. Определить собственные частоты и формы изгибных колебаний стержня с использованием МКЭ.

#### **Типовые задания четвертой КР:**

1. Использовать метод Галеркина для решения задачи Коши для обыкновенного дифференциального уравнения.
2. Использовать МКЭ для решения одномерного конвективного волнового уравнения.

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

### **2.3. Выполнение комплексного индивидуального задания на самостоятельную работу**

Для оценивания навыков и опыта деятельности (владения), как результата обучения по дисциплине, не имеющей курсового проекта или работы, используется индивидуальное комплексное задание студенту.

Типовые шкала и критерии оценки результатов защиты индивидуального комплексного задания приведены в общей части ФОС образовательной программы.

## **2.4. Промежуточная аттестация**

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

### **2.4.1. Процедура промежуточной аттестации без дополнительного аттестационного испытания**

Промежуточная аттестация проводится в форме зачета. Зачет по дисциплине основывается на результатах выполнения предыдущих индивидуальных заданий студента по данной дисциплине.

Критерии выведения итоговой оценки за компоненты компетенций при проведении промежуточной аттестации в виде зачета приведены в общей части ФОС образовательной программы.

### **2.4.2. Процедура промежуточной аттестации с проведением аттестационного испытания**

В отдельных случаях (например, в случае переаттестации дисциплины) промежуточная аттестация в виде зачета по дисциплине может проводиться с проведением аттестационного испытания по билетам. Билет содержит теоретические вопросы (ТВ) для проверки усвоенных знаний, практические задания (ПЗ) для проверки усвоенных умений и комплексные задания (КЗ) для контроля уровня приобретенных владений всех заявленных компетенций.

Билет формируется таким образом, чтобы в него попали вопросы и практические задания, контролирующие уровень сформированности всех заявленных компетенций.

#### **2.4.2.1. Типовые вопросы и задания для зачета по дисциплине**

##### **Типовые вопросы для контроля усвоенных знаний:**

1. Основные концепции МКЭ.
2. Сравнение характеристик МКЭ и метода конечных разностей.
3. Одномерный симплекс-элемент. Получение функций формы. Свойства функций формы. Естественные координаты.
4. Вывод функций формы для линейного и квадратичного одномерного элементов.
5. Треугольный конечный элемент. L-координаты треугольного элемента.
6. Вывод функций формы для линейного и квадратичного треугольных элементов.
7. Четырехугольные конечные элементы.
8. Трехмерные конечные элементы.
9. Математические модели решения задач теории упругости.
10. Запись основных соотношений теории упругости для конечного элемента в матричной форме.
11. Вычисление производных функций формы. Матрица Якоби.
12. Математическая постановка МКЭ. Основные этапы решения задачи МКЭ.
13. Вариационный принцип Геррманна. Функция среднего напряжения. Связь напряжений и деформаций с функцией среднего напряжения. Вывод основного соотношения вариационного принципа Геррманна.

14. Построение конечно-элементной модели конструкции. Формирование матрицы конечного элемента. Формирование глобальной матрицы системы уравнений МКЭ.
15. Методы решения систем линейных алгебраических уравнений.
16. Проведение модального анализа. Уравнение свободных колебаний в матричной форме. Решение собственной задачи.
17. Матрица масс конечного элемента. Получение матрицы масс для одномерного и треугольного симплекс-элементов.
18. Определение собственных частот и собственных форм колебаний конструкции.
19. Проведение гармонического анализа. Вынужденные колебания. Учет вязкоупругих свойств материалов. Метод соответствия.
20. Расчет динамического НДС при действии нагрузки произвольного вида.
21. Методы прямого интегрирования (метод центральных разностей).
22. Вывод уравнений для элементов с помощью метода Галеркина.
23. Метод Галеркина. Одномерные уравнения теории поля.
24. Использование метода Галеркина для решения задачи Коши для обыкновенного дифференциального уравнения.
25. Метод конечных элементов для уравнений с частными производными.
26. Решение краевых задач с помощью метода конечных элементов.
27. Использование метода Галеркина для решения системы дифференциальных уравнений первого порядка.
28. Использование метода Галеркина для решения конвективного волнового уравнения.
29. Одномерные уравнения теории поля на примере уравнения Гельмгольца.
30. Использование метода Галеркина для решения двумерного конвективного волнового уравнения.

**Типовые вопросы и практические задания для контроля освоенных умений:**

1. Вывести функции формы для квадратичного одномерного элемента.
2. Вывести функции формы для квадратичного треугольного конечного элемента.
3. Решить задачу для стержня при действии осевой перегрузки методом конечных элементов с использованием квадратичного одномерного конечного элемента.
4. Применить МКЭ для решения задачи поперечного изгиба балки.
5. Определить продольные собственные частоты и формы колебаний стержня с использованием МКЭ.
6. Определить собственные частоты и формы изгибных колебаний стержня с использованием МКЭ.

**Типовые комплексные задания для контроля приобретенных владений:**

1. Определить напряженно-деформированного состояния прочноскрепленного заряда с гладким цилиндрическим каналом при действии внутреннего давления с использованием МКЭ.
2. Использовать вариационный принцип Германна для определения НДС прочноскрепленного заряда с гладким цилиндрическим каналом при действии внутреннего давления.

3. Определить собственные частоты и формы радиальных механических колебаний прочноскрепленного заряда с гладким цилиндрическим каналом.

4. Провести гармонический анализ для прочноскрепленного заряда с гладким цилиндрическим каналом при действии внутреннего осциллирующего давления с учетом вязкоупругих свойств твердого ракетного топлива.

#### **2.4.2.2. Шкалы оценивания результатов обучения на зачете**

Оценка результатов обучения по дисциплине в форме уровня сформированности компонентов *знать, уметь, владеть* заявленных компетенций проводится по 4-х балльной шкале оценивания.

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

### **3. Критерии оценивания уровня сформированности компонентов компетенций**

#### **3.1. Оценка уровня сформированности компонентов компетенций**

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

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

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

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