

**Министерство науки и высшего образования РФ**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение**  
**высшего образования**  
**«Национальный исследовательский университет «МЭИ»**

---

Направление подготовки/специальность: 14.03.01 Ядерная энергетика и теплофизика

Наименование образовательной программы: Нанотехнологии и наноматериалы в энергетике

Уровень образования: высшее образование - бакалавриат

Форма обучения: Очная

**Рабочая программа дисциплины**  
**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ**  
**НАНОТЕХНОЛОГИИ**

<b>Блок:</b>	Блок 1 «Дисциплины (модули)»
<b>Часть образовательной программы:</b>	Часть, формируемая участниками образовательных отношений
<b>№ дисциплины по учебному плану:</b>	Б1.Ч.09
<b>Трудоемкость в зачетных единицах:</b>	7 семестр - 4; 8 семестр - 2; всего - 6
<b>Часов (всего) по учебному плану:</b>	216 часов
<b>Лекции</b>	7 семестр - 16 часов; 8 семестр - 14 часов; всего - 30 часов
<b>Практические занятия</b>	7 семестр - 48 часа; 8 семестр - 14 часов; всего - 62 часа
<b>Лабораторные работы</b>	не предусмотрено учебным планом
<b>Консультации</b>	7 семестр - 2 часа;
<b>Самостоятельная работа</b>	7 семестр - 77,5 часа; 8 семестр - 43,7 часа; всего - 121,2 часа
<b>в том числе на КП/КР</b>	не предусмотрено учебным планом
<b>Иная контактная работа</b>	проводится в рамках часов аудиторных занятий
<b>включая:</b>	
<b>Контрольная работа</b>	
<b>Промежуточная аттестация:</b>	
<b>Экзамен</b>	7 семестр - 0,5 часа;
<b>Зачет с оценкой</b>	8 семестр - 0,3 часа; всего - 0,8 часа

**Москва 2023**

**ПРОГРАММУ СОСТАВИЛ:**

Преподаватель

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Волков Ю.А.
	Идентификатор	R23e9797a-VolkovYurA-41f285d8

Ю.А. Волков

**СОГЛАСОВАНО:**

Руководитель  
образовательной программы

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Дмитриев А.С.
	Идентификатор	R8d0ce031-DmitriyevAS-aaaaae29

А.С. Дмитриев

Заведующий выпускающей  
кафедрой

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Пузина Ю.Ю.
	Идентификатор	Re86e9a56-Puzina-4d2acad1

Ю.Ю. Пузина

## 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

**Цель освоения дисциплины:** Изучение физических основ нано- и мембранных технологий, динамики микро-электромеханических систем и методов моделирования протекающих в них процессов, формирование представлений об областях их применения

### Задачи дисциплины

- изучение физических параметров, характеризующих механическое воздействие на материалы упругих элементов в конструкциях микроэлектромеханических устройств;
- изучение методов численного моделирования процессов в микро- и нано-электромеханических системах и их применение в технике;
- освоение методов численного решения задач теории упругости, связанных микро-электромеханическими устройствами;
- приобретение навыков применения этих методов при работе в научной и инженерной практике.

Формируемые у обучающегося **компетенции** и запланированные **результаты обучения** по дисциплине, соотнесенные с **индикаторами достижения компетенций**:

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции	Запланированные результаты обучения
ПК-3 Способен к разработке наноразмерных материалов и устройств	ИД-3ПК-3 Имеет навыки расчета теплофизических процессов в современных низкоразмерных устройствах, навыки компьютерного моделирования этих процессов	знать: - основные физические величины и уравнения, возникающие при описании тел в деформированном состоянии; - численные методы для моделирования процессов в микро- и нано-электромеханических устройствах.  уметь: - самостоятельно разбираться в методах математического моделирования работы микро-электромеханических устройств; - работать на современных языках программирования высокого уровня.

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ ВО

Дисциплина относится к основной профессиональной образовательной программе Нанотехнологии и наноматериалы в энергетике (далее – ОПОП), направления подготовки 14.03.01 Ядерная энергетика и теплофизика, уровень образования: высшее образование - бакалавриат.

Требования к входным знаниям и умениям:

- знать Математика
- знать Физика (общая)
- знать Физика специальная
- знать Термодинамика
- знать Тепломассобмен
- знать Физика конденсированного состояния

Результаты обучения, полученные при освоении дисциплины, необходимы при выполнении выпускной квалификационной работы.

### 3. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

#### 3.1 Структура дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 6 зачетных единиц, 216 часов.

№ п/п	Разделы/темы дисциплины/формы промежуточной аттестации	Всего часов на раздел	Семестр	Распределение трудоемкости раздела (в часах) по видам учебной работы										Содержание самостоятельной работы/ методические указания	
				Контактная работа							СР				
				Лек	Лаб	Пр	Консультация		ИКР		ПА	Работа в семестре	Подготовка к аттестации /контроль		
КПР	ГК	ИККП	ТК												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
1	Основные понятия теории упругости	18	7	2	-	8	-	-	-	-	-	8	-	<p><b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Основные понятия теории упругости"</p> <p><b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b></p> <p>[1], 9-27 [2], 11-66 [7], 9-27</p>	
1.1	Теория упругости	9		1	-	4	-	-	-	-	-	4	-		
1.2	Уравнения, описывающие состояние деформированных тел	9		1	-	4	-	-	-	-	-	4	-		
2	Упругие свойства кристаллов	18		2	-	8	-	-	-	-	-	8	-		<p><b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Упругие свойства кристаллов"</p> <p><b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b></p> <p>[1], 124-143 [4], 149-170 [7], 124-143</p>
2.1	Свободная энергия деформированного кристалла	9		1	-	4	-	-	-	-	-	4	-		
2.2	Уравнения движения для смещений	9		1	-	4	-	-	-	-	-	4	-		
3	Динамика упругих элементов	18		2	-	8	-	-	-	-	-	8	-		
3.1	Уравнение малых колебаний мембраны	9		1	-	4	-	-	-	-	-	4	-		<p><b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Динамика упругих элементов"</p> <p><b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b></p> <p>[2], 56-140 [7], 355-417</p>
3.2	Вынужденные колебания мембраны	9		1	-	4	-	-	-	-	-	4	-		
4	Колебания и прогибы тонких пластин	18		2	-	8	-	-	-	-	-	8	-		<p><b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение</p>

4.1	Жесткость пластины на изгиб	9		1	-	4	-	-	-	-	-	4	-	дополнительного материала по разделу "Колебания и прогибы тонких пластин" <b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], 62-75 [3], 227-247 [7], 62-75
4.2	Консольные балки как кантилеверы атомно-силовых микроскопов	9		1	-	4	-	-	-	-	-	4	-	
5	Численные методы решения уравнения малого прогиба мембраны	18		4	-	8	-	-	-	-	-	6	-	<b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Численные методы решения уравнения малого прогиба мембраны" <b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [5], 92-99 [6], 164-197
5.1	Конечно-разностная задача Штурма-Лиувилля для оператора Лапласа	18		4	-	8	-	-	-	-	-	6	-	
6	Одномерные математические модели микро-электромеханических систем	18		4	-	8	-	-	-	-	-	6	-	<b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Одномерные математические модели микро-электромеханических систем" <b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [3], 197-247
6.1	Микро-электромеханические системы с управлением электрическим полем	18		4	-	8	-	-	-	-	-	6	-	
	Экзамен	36.0		-	-	-	-	2	-	-	0.5	-	33.5	
	<b>Всего за семестр</b>	<b>144.0</b>		<b>16</b>	<b>-</b>	<b>48</b>	<b>-</b>	<b>2</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>0.5</b>	<b>44</b>	<b>33.5</b>	
	<b>Итого за семестр</b>	<b>144.0</b>		<b>16</b>	<b>-</b>	<b>48</b>	<b>2</b>				<b>0.5</b>		<b>77.5</b>	
7	Задача Штурма-Лиувилля в двумерной постановке	16	8	4	-	4	-	-	-	-	-	8	-	<b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Задача Штурма-Лиувилля в двумерной постановке" <b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [5], 181-197 [6], 164-211
7.1	Разделение переменных для двумерного оператора Лапласа	8		2	-	2	-	-	-	-	-	4	-	
7.2	Собственные функции и собственные	8		2	-	2	-	-	-	-	-	4	-	

	значения и их связь с сеточным преобразованием Фурье в двух измерениях												
8	Модели микро-электромеханических систем	24	8	-	8	-	-	-	-	-	8	-	<b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Модели микро-электромеханических систем" <b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], 142-186 [3], 16-37, 396-414 [7], 142-186
8.1	Понятие об итерационных методах решения нелинейных уравнений	12	4	-	4	-	-	-	-	-	4	-	
8.2	Бигармоническое уравнение равновесия	12	4	-	4	-	-	-	-	-	4	-	
9	Большие прогибы упругих элементов	14	2	-	2	-	-	-	-	-	10	-	<b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Большие прогибы упругих элементов" <b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], 60-119 [3], 396-435 [7], 60-119
9.1	Анализ критериев малости прогиба	14	2	-	2	-	-	-	-	-	10	-	
	Зачет с оценкой	18.0	-	-	-	-	-	-	-	0.3	-	17.7	
	Всего за семестр	72.0	14	-	14	-	-	-	-	0.3	26	17.7	
	Итого за семестр	72.0	14	-	14	-	-	-	-	0.3	43.7		
	<b>ИТОГО</b>	<b>216.0</b>	-	<b>30</b>	-	<b>62</b>	<b>2</b>	-	-	<b>0.8</b>	<b>121.2</b>		

**Примечание:** Лек – лекции; Лаб – лабораторные работы; Пр – практические занятия; КПП – аудиторные консультации по курсовым проектам/работам; ИККП – индивидуальные консультации по курсовым проектам/работам; ГК- групповые консультации по разделам дисциплины; СР – самостоятельная работа студента; ИКР – иная контактная работа; ТК – текущий контроль; ПА – промежуточная аттестация

## 3.2 Краткое содержание разделов

### 1. Основные понятия теории упругости

#### 1.1. Теория упругости

Цели и задачи дисциплины. Смещения, деформации и напряжения. Закон Гука. Модуль Юнга и коэффициент Пуассона как упругие характеристики материала.

#### 1.2. Уравнения, описывающие состояние деформированных тел

Энергия деформированного состояния в гармоническом приближении и упругие модули второго порядка. Соотношения Дюамеля-Неймана. Уравнения равновесия изотропного тела. Температурное расширение тел и деформации с изменением температуры.

### 2. Упругие свойства кристаллов

#### 2.1. Свободная энергия деформированного кристалла

Тензор упругих модулей в случае кубической решетки. Соотношения Дюамеля-Неймана для кристалла с кубической решеткой.

#### 2.2. Уравнения движения для смещений

Сравнение со случаем изотропного тела и критерий изотропности тела.

### 3. Динамика упругих элементов

#### 3.1. Уравнение малых колебаний мембраны

Решение однородного волнового уравнения для мембраны с закрепленным краем. Собственные моды и собственные частоты колебаний. Представление решения в виде ряда по собственным модам.

#### 3.2. Вынужденные колебания мембраны

Явление резонанса.

### 4. Колебания и прогибы тонких пластин

#### 4.1. Жесткость пластины на изгиб

Волны изгиба. Бигамоническое уравнение динамики пластин и консольных балок.

#### 4.2. Консольные балки как кантилеверы атомно-силовых микроскопов

Собственные частоты колебаний пластин.

### 5. Численные методы решения уравнения малого прогиба мембраны

#### 5.1. Конечно-разностная задача Штурма-Лиувилля для оператора Лапласа

Собственные векторы и собственные значения конечно-разностной задачи Штурма-Лиувилля. Ортогональность сеточных собственных функций. Сравнение с континуальной теорией. Представление решения в виде конечного ряда по сеточным собственным функциям задачи Штурма-Лиувилля.

### 6. Одномерные математические модели микро-электромеханических систем

#### 6.1. Микро-электромеханические системы с управлением электрическим полем

Давление поля в квазиплоском приближении. Понятие об итерационных методах решения уравнений динамики микро-электромеханических систем. Эффект неконтролируемого схлопывания электродов при достижении критического напряжения как бифуркация решения нелинейного уравнения.

### 7. Задача Штурма-Лиувилля в двумерной постановке

7.1. Разделение переменных для двумерного оператора Лапласа  
Конечно-разностная задача Штурма-Лиувилля для двумерного оператора Лапласа.

7.2. Собственные функции и собственные значения и их связь с сеточным преобразованием Фурье в двух измерениях  
Представление решения конечно-разностной задачи в виде сеточного ряда Фурье.

### 8. Модели микро-электромеханических систем

8.1. Понятие об итерационных методах решения нелинейных уравнений  
«Вязкое» приближение для вычисления стационарного положения упругого элемента.

8.2. Бигармоническое уравнение равновесия  
Волновое уравнение с бигармоническим оператором для описания волн изгиба в двумерном случае.

### 9. Большие прогибы упругих элементов

9.1. Анализ критериев малости прогиба  
Однослойный графен - пример материала, для которого любой прогиб будет большим. Гауссова кривизна поверхности и ее связь с напряжениями в упругом элементе в случае больших прогибов. Описание сильно деформированных упругих элементов уравнениями Фешля.

### **3.3. Темы практических занятий**

1. Реализация алгоритма решения уравнений динамики упругих элементов в микро-электромеханической системе;
2. Реализация итерационного метода для расчета статических прогибов упругих элементов на численном алгоритме;
3. Общая схема итерационного метода для расчета статических прогибов упругих элементов с учетом конечной жесткости на изгиб;
4. Бигармоническое уравнение динамики пластин и консольных балок. Численные модели и их реализация;
5. Реализация двумерного сеточного преобразования Фурье в виде функции;
6. Расчет динамики микро-электромеханической системы (в одномерной постановке);
7. Конечно-разностная задача Штурма-Лиувилля для оператора Лапласа;
8. Собственные моды и собственные частоты колебаний. Представление решения в виде ряда по собственным модам. Численные алгоритмы для получения решений уравнений;
9. Уравнения движения для смещений. Сравнение со случаем изотропного тела и критерий изотропности тела;
10. Общая схема алгоритма решения уравнений динамики упругих элементов в микро-электромеханической системе;

11. Численное определение критических параметров устойчивости системы.

**3.4. Темы лабораторных работ**  
не предусмотрено

**3.5 Консультации**

*Групповые консультации по разделам дисциплины (ГК)*

1. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Основные понятия теории упругости"
2. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Упругие свойства кристаллов"
3. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Динамика упругих элементов"
4. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Колебания и прогибы тонких пластин"
5. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Численные методы решения уравнения малого прогиба мембраны"
6. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Одномерные математические модели микро-электромеханических систем"
7. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Задача Штурма-Лиувилля в двумерной постановке"
8. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Модели микро-электромеханических систем"
9. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Большие прогибы упругих элементов"

**3.6 Тематика курсовых проектов/курсовых работ**  
Курсовой проект/ работа не предусмотрены

### 3.7. Соответствие разделов дисциплины и формируемых в них компетенций

Запланированные результаты обучения по дисциплине (в соответствии с разделом 1)	Коды индикаторов	Номер раздела дисциплины (в соответствии с п.3.1)									Оценочное средство (тип и наименование)	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9		
<b>Знать:</b>												
численные методы для моделирования процессов в микро- и нано-электромеханических устройствах	ИД-3ПК-3									+	+	Контрольная работа/Итерационные методы для расчета статических прогибов упругих элементов Контрольная работа/Реализации двумерного сеточного преобразования Фурье в виде функции
основные физические величины и уравнения, возникающие при описании тел в деформированном состоянии	ИД-3ПК-3	+		+		+						Контрольная работа/Собственные моды и собственные частоты колебаний. Представление решения в виде ряда по собственным модам Контрольная работа/Уравнения равновесия изотропного тела. Температурное расширение тел и деформации с изменением температуры
<b>Уметь:</b>												
работать на современных языках программирования высокого уровня	ИД-3ПК-3										+	Контрольная работа/Динамика упругих элементов в микро-электромеханической системе в двумерной постановке Контрольная работа/Сильно деформированные упругие элементы и уравнения Феппля
самостоятельно разбираться в методах математического моделирования работы микро-электромеханических устройств	ИД-3ПК-3		+		+		+					Контрольная работа/Понятие об итерационных методах решения уравнений динамики микро-электромеханических систем Контрольная работа/Собственные векторы и

												собственные значения конечно-разностной задачи Штурма-Лиувилля
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

## **4. КОМПЕТЕНТНОСТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОСВОЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (ТЕКУЩИЙ КОНТРОЛЬ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНАЯ АТТЕСТАЦИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ)**

### **4.1. Текущий контроль успеваемости**

**7 семестр**

Форма реализации: Письменная работа

1. Понятие об итерационных методах решения уравнений динамики микро-электромеханических систем (Контрольная работа)
2. Собственные векторы и собственные значения конечно-разностной задачи Штурма-Лиувилля (Контрольная работа)
3. Собственные моды и собственные частоты колебаний. Представление решения в виде ряда по собственным модам (Контрольная работа)
4. Уравнения равновесия изотропного тела. Температурное расширение тел и деформации с изменением температуры (Контрольная работа)

**8 семестр**

Форма реализации: Письменная работа

1. Динамика упругих элементов в микро-электромеханической системе в двумерной постановке (Контрольная работа)
2. Итерационные методы для расчета статических прогибов упругих элементов (Контрольная работа)
3. Реализации двумерного сеточного преобразования Фурье в виде функции (Контрольная работа)
4. Сильно деформированные упругие элементы и уравнения Фешля (Контрольная работа)

Балльно-рейтинговая структура дисциплины является приложением А.

### **4.2 Промежуточная аттестация по дисциплине**

Экзамен (Семестр №7)

Итоговая оценка по курсу выставляется на основе оценки за промежуточную аттестацию. Возможен случай, когда в силу значительно отличающейся текущей оценки может быть применен повышающий или понижающий коэффициент

Зачет с оценкой (Семестр №8)

Итоговая оценка по курсу выставляется на основе оценки за промежуточную аттестацию. Возможен случай, когда в силу значительно отличающейся текущей оценки может быть применен повышающий или понижающий коэффициент

В диплом выставляется оценка за 8 семестр.

**Примечание:** Оценочные материалы по дисциплине приведены в фонде оценочных материалов ОПОП.

## **5. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

### 5.1 Печатные и электронные издания:

1. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика. Т.7. Теория упругости : Учебное пособие для физических специальностей университетов / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц . – 4-е изд., испр. и доп . – М. : Наука, 1987 . – 248 с.;
2. Новацкий, В. Теория упругости : пер. с пол. / В. Новацкий . – М. : Мир, 1975 . – 872 с.;
3. Зарубин, В. С. Математические модели механики и электродинамики сплошной среды / В. С. Зарубин, Г. Н. Кувыркин . – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008 . – 512 с. – (Математическое моделирование в технике и в технологии) . - ISBN 978-5-7038-3162-5 .;
4. Киттель, Ч. Введение в физику твердого тела : пер. с англ. / Ч. Киттель . – 4-е изд . – М. : Наука, 1978 . – 792 с.;
5. Федоренко, Р. П. Введение в вычислительную физику : Учебное пособие для вузов по направлениям "Математика", "Физика", специальностям "Математика", "Прикладная математика", "Физика" / Р. П. Федоренко . – М. : Изд-во МФТИ, 1994 . – 528 с. - Кх-7, од-1, чзп-1, чз-1 . - ISBN 5-7417-0002-0 : 9100.00 .;
6. Самарский, А. А. Методы решения сеточных уравнений : учебное пособие по спец. "Прикладная математика" / А. А. Самарский, Е. С Николаев . – М. : Наука, 1978 . – 591 с.;
7. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.- "Теория упругости" Т. 7, (5-е изд., стер.), Издательство: "ФИЗМАТЛИТ", Москва, 2007 - (264 с.)  
[https://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_cid=25&pl1\\_id=2233](https://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=2233).

### 5.2 Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:

1. Office / Российский пакет офисных программ.

### 5.3 Интернет-ресурсы, включая профессиональные базы данных и информационно-справочные системы:

1. ЭБС Лань - <https://e.lanbook.com/>
2. Научная электронная библиотека - <https://elibrary.ru/>
3. База данных Web of Science - <http://webofscience.com/>
4. База данных Scopus - <http://www.scopus.com>
5. Национальная электронная библиотека - <https://rusneb.ru/>
6. Электронная библиотека МЭИ (ЭБ МЭИ) - <http://elib.mpei.ru/login.php>
7. Портал открытых данных Российской Федерации - <https://data.gov.ru>
8. База открытых данных Министерства труда и социальной защиты РФ - <https://rosmintrud.ru/opendata>
9. База открытых данных профессиональных стандартов Министерства труда и социальной защиты РФ - <http://profstandart.rosmintrud.ru/obshchiy-informatsionnyy-blok/natsionalnyy-reestr-professionalnykh-standartov/>
10. База открытых данных Министерства экономического развития РФ - <http://www.economy.gov.ru>
11. База открытых данных Росфинмониторинга - <http://www.fedsfm.ru/opendata>
12. Электронная открытая база данных "Polpred.com Обзор СМИ" - <https://www.polpred.com>
13. Национальный портал онлайн обучения «Открытое образование» - <https://openedu.ru>
14. Официальный сайт Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии - <http://protect.gost.ru/>
15. Открытая университетская информационная система «РОССИЯ» - <https://uisrussia.msu.ru>

## 6. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Тип помещения	Номер аудитории, наименование	Оснащение
---------------	-------------------------------	-----------

Учебные аудитории для проведения лекционных занятий и текущего контроля	М-409/2, Аудитория каф. "НТ"	стол преподавателя, стол, доска меловая, мультимедийный проектор
	М-422/4, Учебная лаборатория криофизики	стол, стул, мультимедийный проектор
	М-412, Учебная аудитория	стеллаж для хранения книг, стол, стул, мультимедийный проектор, доска маркерная
	Ж-120, Машинный зал ИВЦ	сервер, кондиционер
Учебные аудитории для проведения практических занятий, КР и КП	М-409/2, Аудитория каф. "НТ"	стол преподавателя, стол, доска меловая, мультимедийный проектор
	М-422/4, Учебная лаборатория криофизики	стол, стул, мультимедийный проектор
	М-412, Учебная аудитория	стеллаж для хранения книг, стол, стул, мультимедийный проектор, доска маркерная
	Ж-120, Машинный зал ИВЦ	сервер, кондиционер
Учебные аудитории для проведения промежуточной аттестации	М-409/2, Аудитория каф. "НТ"	стол преподавателя, стол, доска меловая, мультимедийный проектор
	М-422/4, Учебная лаборатория криофизики	стол, стул, мультимедийный проектор
	М-412, Учебная аудитория	стеллаж для хранения книг, стол, стул, мультимедийный проектор, доска маркерная
	Ж-120, Машинный зал ИВЦ	сервер, кондиционер
Помещения для самостоятельной работы	М-411/1, Компьютерный класс	стол, стул, доска меловая, мультимедийный проектор, компьютер персональный
Помещения для консультирования	М-423/1, Аудитория каф. "НТ"	стул, стол письменный
Помещения для хранения оборудования и учебного инвентаря	М-407/1, Кладовая	стеллаж для хранения инвентаря, стеллаж для хранения книг, инвентарь специализированный

## БАЛЛЬНО-РЕЙТИНГОВАЯ СТРУКТУРА ДИСЦИПЛИНЫ

### Компьютерное моделирование процессов нанотехнологии

(название дисциплины)

#### 7 семестр

#### Перечень контрольных мероприятий текущего контроля успеваемости по дисциплине:

- КМ-1 Уравнения равновесия изотропного тела. Температурное расширение тел и деформации с изменением температуры (Контрольная работа)
- КМ-2 Собственные моды и собственные частоты колебаний. Представление решения в виде ряда по собственным модам (Контрольная работа)
- КМ-3 Собственные векторы и собственные значения конечно-разностной задачи Штурма-Лиувилля (Контрольная работа)
- КМ-4 Понятие об итерационных методах решения уравнений динамики микро-электромеханических систем (Контрольная работа)

#### Вид промежуточной аттестации – Экзамен.

Номер раздела	Раздел дисциплины	Индекс КМ:	КМ-1	КМ-2	КМ-3	КМ-4
		Неделя КМ:	4	8	12	16
1	Основные понятия теории упругости					
1.1	Теория упругости		+	+		
1.2	Уравнения, описывающие состояние деформированных тел		+	+		
2	Упругие свойства кристаллов					
2.1	Свободная энергия деформированного кристалла				+	+
2.2	Уравнения движения для смещений				+	+
3	Динамика упругих элементов					
3.1	Уравнение малых колебаний мембраны		+	+		
3.2	Вынужденные колебания мембраны		+	+		
4	Колебания и прогибы тонких пластин					
4.1	Жесткость пластины на изгиб				+	+
4.2	Консольные балки как кантилеверы атомно-силовых микроскопов				+	+
5	Численные методы решения уравнения малого прогиба мембраны					

5.1	Конечно-разностная задача Штурма-Лиувилля для оператора Лапласа	+	+		
6	Одномерные математические модели микро-электромеханических систем				
6.1	Микро-электромеханические системы с управлением электрическим полем			+	+
Вес КМ, %:		20	20	30	30

### 8 семестр

**Перечень контрольных мероприятий текущего контроля успеваемости по дисциплине:**

- КМ-5 Реализации двумерного сеточного преобразования Фурье в виде функции (Контрольная работа)
- КМ-6 Итерационные методы для расчета статических прогибов упругих элементов (Контрольная работа)
- КМ-7 Динамика упругих элементов в микро-электромеханической системе в двумерной постановке (Контрольная работа)
- КМ-8 Сильно деформированные упругие элементы и уравнения Феппля (Контрольная работа)

**Вид промежуточной аттестации – Зачет с оценкой.**

Номер раздела	Раздел дисциплины	Индекс КМ:	КМ-5	КМ-6	КМ-7	КМ-8
		Неделя КМ:	4	8	12	16
1	Задача Штурма-Лиувилля в двумерной постановке					
1.1	Разделение переменных для двумерного оператора Лапласа		+	+		
1.2	Собственные функции и собственные значения и их связь с сеточным преобразованием Фурье в двух измерениях		+	+		
2	Модели микро-электромеханических систем					
2.1	Понятие об итерационных методах решения нелинейных уравнений		+	+		
2.2	Бигармоническое уравнение равновесия		+	+		
3	Большие прогибы упругих элементов					
3.1	Анализ критериев малости прогиба				+	+
Вес КМ, %:			20	20	30	30