

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет  
им. Н.И. Лобачевского»**

Институт информационных технологий, математики и механики

---

УТВЕРЖДЕНО

решением президиума Ученого совета ННГУ

протокол № 1 от 16.01.2024 г.

**Рабочая программа дисциплины**

Нелинейные модели деформируемых твердых тел

---

Уровень высшего образования

Специалитет

---

Направление подготовки / специальность

01.05.01 - Фундаментальные математика и механика

---

Направленность образовательной программы

Фундаментальная механика и приложения

---

Форма обучения

очная

---

г. Нижний Новгород

2024 год начала подготовки

## 1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.О.24.04 Нелинейные модели деформируемых твердых тел относится к обязательной части образовательной программы.

## 2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями и индикаторами достижения компетенций)

Формируемые компетенции (код, содержание компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства	
	Индикатор достижения компетенции (код, содержание индикатора)	Результаты обучения по дисциплине	Для текущего контроля успеваемости	Для промежуточной аттестации
ОПК-1: Способен находить, формулировать и решать актуальные и значимые проблемы фундаментальной математики и механики	ОПК-1.1: Знает основы фундаментальных физико-математических дисциплин и других естественных наук ОПК-1.2: Умеет формулировать, анализировать и решать профессиональные задачи с применением фундаментальных знаний математики, физики и других естественных наук ОПК-1.3: Имеет практический опыт постановки и решения актуальных задач математики и механики	ОПК-1.1: Знает основные закономерности, положения, терминологию и методологию в области нелинейных моделей деформируемых твёрдых тел  ОПК-1.2: Умеет формулировать, анализировать и решать задачи нелинейных моделей деформируемых твёрдых тел  ОПК-1.3: Владеет опытом решения задач физико-механических воздействий на нелинейные модели деформируемых твёрдых тел	Расчетно-графическая работа	Зачёт: Контрольные вопросы
ОПК-2: Способен создавать, анализировать и реализовывать новые математические модели в современном естествознании, технике, экономике и управлении	ОПК-2.1: Знает основные положения, терминологию и методологию в области математического и алгоритмического моделирования ОПК-2.2: Умеет осуществлять анализ и выбор методов решения задач профессиональной и научной деятельности на основе теоретических знаний в области математических и компьютерных наук	ОПК-2.1: Знает - основные закономерности необратимого деформирования и разрушения конструкционных материалов при различных режимах физико-механических воздействий; модели пластичности, ползучести и накопления повреждений.  ОПК-2.2: Умеет осуществлять анализ и выбор методов решения задач	Расчетно-графическая работа	Зачёт: Контрольные вопросы

	ОПК-2.3: Имеет практический опыт разработки новых методов математического моделирования для решения задач профессиональной и научной деятельности	профессиональной и научной деятельности на основе теоретических знаний в области нелинейных моделей деформируемых твёрдых тел  ОПК-2.3: Владеет опытом разработки новых методов математического моделирования для решения задач профессиональной и научной деятельности в области нелинейных моделей деформируемых твёрдых тел		
ОПК-4: Способен использовать в педагогической деятельности научные основы знаний в сфере математики и механики	ОПК-4.1: Знает основы преподавания физико-математических дисциплин и компьютерных наук в средней школе, специальных и высших учебных заведениях ОПК-4.2: Умеет использовать полученные фундаментальные и специальные знания в области физико-математических наук в преподавательской деятельности ОПК-4.3: Имеет практический опыт планирования и подготовки учебных занятий, а также представления известных научных знаний и результатов собственных научных исследований	ОПК-4.1: Знает основы преподавания физико-математических дисциплин и компьютерных наук в средней школе, специальных и высших учебных заведениях.  ОПК-4.2: Умеет использовать полученные фундаментальные и специальные знания в области физико-математических наук в преподавательской деятельности.  ОПК-4.3: Владеет навыками планирования и подготовки учебных занятий, а также представления известных научных знаний и результатов собственных научных исследований	Расчетно-графическая работа	Зачёт: Контрольные вопросы

### 3. Структура и содержание дисциплины

#### 3.1 Трудоемкость дисциплины

	<b>очная</b>
<b>Общая трудоемкость, з.е.</b>	<b>3</b>
<b>Часов по учебному плану</b>	<b>108</b>
в том числе	

<b>аудиторные занятия (контактная работа):</b>	
- занятия лекционного типа	<b>32</b>
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	<b>32</b>
- КСР	<b>1</b>
<b>самостоятельная работа</b>	<b>43</b>
<b>Промежуточная аттестация</b>	<b>0</b> <b>Зачёт</b>

### 3.2. Содержание дисциплины

(структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий)

Наименование разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	в том числе			
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них			Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа (практические занятия/лабораторные работы), часы	Всего	
0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	
Введение. Эффекты необратимого поведения конструкционных материалов при различных режимах термосиловых нагружений	12	4	4	8	4
Описание процессов нелинейного деформирования и деградации свойств конструкционных материалов в рамках соотношений механики поврежденной среды	14	4	4	8	6
Основные положения, используемые при построении моделей пластического течения. Модели теории пластического течения	14	4	4	8	6
Проверка адекватности применения моделей термопластичности с комбинированным упрочнением	14	4	4	8	6
Модели, описывающие процессы ползучести и релаксации напряжений в конструкционных материалах при квазистатических термосиловых нагружениях	14	4	4	8	6
Моделирование процессов необратимого деформирования и разрушения материалов в рамках соотношений механики поврежденной среды	14	4	4	8	6
Особенности моделирования процессов деформирования и разрушения материалов при малоцикловых термосиловых нагружениях	13	4	4	8	5
Моделирование процессов многоциклового усталости конструкционных материалов	12	4	4	8	4
Аттестация	0				
КСР	1			1	
Итого	108	32	32	65	43

#### Содержание разделов и тем дисциплины

1. Введение. Эффекты необратимого поведения конструкционных материалов при различных режимах термосиловых нагружений.
2. Описание процессов нелинейного деформирования и деградации свойств конструкционных

материалов в рамках соотношений механики поврежденной среды.

3. Основные положения, используемые при построении моделей пластического течения. Модели теории пластического течения.
4. Проверка адекватности применения моделей термопластичности с комбинированным упрочнением.
5. Модели, описывающие процессы ползучести и релаксации напряжений в конструкционных материалах при квазистатических термосиловых нагружениях.
6. Моделирование процессов необратимого деформирования и разрушения материалов в рамках соотношений механики поврежденной среды.
7. Особенности моделирования процессов деформирования и разрушения материалов при малоцикловых термосиловых нагружениях.
8. Моделирование процессов многоцикловой усталости конструкционных материалов.

#### **4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся**

Самостоятельная работа обучающихся включает в себя подготовку к контрольным вопросам и заданиям для текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины приведенным в п. 5.

Самостоятельная работа должна состоять в практическом применении полученных знаний путем:

- получения материальных функций моделей деформирования и разрушения материалов;
- реализации моделей деформирования и разрушения материалов;
- проведения численных исследований.

#### **5. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)**

**5.1 Типовые задания, необходимые для оценки результатов обучения при проведении текущего контроля успеваемости с указанием критериев их оценивания:**

**5.1.1 Типовые задания (оценочное средство - Расчетно-графическая работа) для оценки сформированности компетенции ОПК-1:**

##### **1. Пластичность**

Модуль Юнга материала  $E$  имеет следующую зависимость от температуры  $T$  :

$$E(T) = 206000 - 83 \cdot T, \text{ МПа}, \quad (1.1)$$

где  $T$  - температура в  $^{\circ}\text{C}$ .

Начальный предел текучести материала описывается соотношением:

$$\sigma_T^0(T) = 115 + 239 \cdot \exp(-0,0022 \cdot (T + 273)). \quad (1.2)$$

Диаграмма деформирования материала при текущей температуре  $T$  и уровне пластических деформаций  $e_{11}^p$  определяется на основе формулы:

$$\sigma_{11}(T, e_{11}^p) = \sigma_T^0(T) + A(T) \cdot (e_{11}^p)^{n(T)} \quad (1.3)$$

где

$$A(T) = 1408 - 1.4 \cdot T; \quad (1.4)$$

$$n(T) = 0.7 \cdot \left( \frac{A}{1000} \right)^{0.4}. \quad (1.5)$$

Варианты температур:

1.  $T = 50^\circ\text{C}$ ;
2.  $T = 100^\circ\text{C}$ ;
3.  $T = 150^\circ\text{C}$ ;
4.  $T = 200^\circ\text{C}$ ;
5.  $T = 250^\circ\text{C}$ ;
6.  $T = 300^\circ\text{C}$ .

---

### Задание

1.1. Постройте диаграмму деформирования материала  $\sigma_{11}(e_{11})$ , выбрав максимальное значение  $e_{11}$  из условия  $e_{11}^e = (0.15 \div 0.20) \cdot e_{11}$  (соответственно  $e_{11}^p = (0.80 \div 0.85) \cdot e_{11}$ ).

1.2. Постройте зависимость радиуса поверхности текучести  $C_p(k_p)$  (таблица и график) в предположении, что упрочнение изотропно ( $k_p^{\max} = 0.05; \Delta k_p = 0.0025$ ).

1.3. Вычислите значения материальных функций  $g_1$  и  $g_2$  в предположении, что упрочнение чисто кинематическое ( $k_p^{\max} = 0.05; \Delta k_p = 0.0025$ ). Постройте зависимость  $\Delta C_p(k_p)$  (таблица) на основе разницы исходной диаграммы (1.3) и диаграммы, полученной с использованием вычисленных значений  $g_1$  и  $g_2$ .

**5.1.2 Типовые задания (оценочное средство - Расчетно-графическая работа) для оценки сформированности компетенции ОПК-2:**



**5.1.3 Типовые задания (оценочное средство - Расчетно-графическая работа) для оценки сформированности компетенции ОПК-4:**

**Критерии оценивания (оценочное средство - Расчетно-графическая работа)**

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Ответ полный и правильный на основании изученной теории; теоретический материал и решение поставленных задач изложены в необходимой логической последовательности, грамотный научный язык; ответ самостоятельный. Могут быть допущены две-три

Оценка	Критерии оценивания
	несущественные ошибки, исправленные по требованию преподавателя.
не зачтено	Ответ обнаруживает непонимание студентом основного содержания учебного материала или допущены существенные ошибки, которые не могут быть исправлены при наводящих вопросах преподавателя.

## 5.2. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине при промежуточной аттестации

### Шкала оценивания сформированности компетенций

Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций)	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
	не зачтено			зачтено			
<u>Знания</u>	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Ошибок нет.	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.
<u>Умения</u>	Отсутствие минимальных умений. Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки	Продемонстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с отдельными несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов
<u>Навыки</u>	Отсутствие базовых навыков. Невозможность оценить наличие навыков	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели	Имеется минимальный набор навыков для решения	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартны	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартны	Продемонстрированы навыки при решении нестандарт	Продемонстрирован творческий подход к решению нестандартны

	вследствие отказа обучающегося от ответа	место грубые ошибки	стандартны х задач с некоторым и недочетами	х задач с некоторым и недочетами	х задач без ошибок и недочетов	ных задач без ошибок и недочетов	х задач
--	--	---------------------	---	----------------------------------	--------------------------------	----------------------------------	---------

### Шкала оценивания при промежуточной аттестации

Оценка		Уровень подготовки
зачтено	<b>превосходно</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне выше предусмотренного программой
	<b>отлично</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично».
	<b>очень хорошо</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо»
	<b>хорошо</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо».
	<b>удовлетворительно</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
не зачтено	<b>неудовлетворительно</b>	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно».
	<b>плохо</b>	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

### 5.3 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения на промежуточной аттестации с указанием критериев их оценивания:

#### 5.3.1 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ОПК-1

1. Основные закономерности упругопластического деформирования материалов
2. Деформирование материалов в условиях одноосного сжатия
3. Эффект Баушингера
4. Влияние на диаграмму упругопластического деформирования материала условий испытания
5. Условие текучести Мизеса
6. Поверхность текучести
7. Изотропное упрочнение
8. Кинематическое упрочнение

9. Комбинированное упрочнение
10. Теория пластического течения
11. Деформационная теория пластичности
12. Ползучесть материалов
13. Кривая ползучести
14. Кривая релаксации напряжений
15. Предел ползучести
16. Одномерные определяющие уравнения ползучести
17. Теория старения
18. Теория течения
19. Теория упрочнения
20. Теория структурных параметров
21. Линейная теория наследственности
22. Нелинейные теории наследственности

### **5.3.2 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ОПК-2**

1. Основные закономерности упругопластического деформирования материалов
2. Деформирование материалов в условиях одноосного сжатия
3. Эффект Баушингера
4. Влияние на диаграмму упругопластического деформирования материала условий испытания
5. Условие текучести Мизеса
6. Поверхность текучести
7. Изотропное упрочнение
8. Кинематическое упрочнение
9. Комбинированное упрочнение
10. Теория пластического течения
11. Деформационная теория пластичности
12. Ползучесть материалов
13. Кривая ползучести

- 14.Кривая релаксации напряжений
- 15.Предел ползучести
- 16.Одномерные определяющие уравнения ползучести
- 17.Теория старения
- 18.Теория течения
- 19.Теория упрочнения
- 20.Теория структурных параметров
- 21.Линейная теория наследственности
- 22.Нелинейные теории наследственности

### **5.3.3 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ОПК-4**

1. Основные закономерности упругопластического деформирования материалов
2. Деформирование материалов в условиях одноосного сжатия
3. Эффект Баушингера
4. Влияние на диаграмму упругопластического деформирования материала условий испытания
5. Условие текучести Мизеса
6. Поверхность текучести
7. Изотропное упрочнение
8. Кинематическое упрочнение
9. Комбинированное упрочнение
- 10.Теория пластического течения
- 11.Деформационная теория пластичности
- 12.Ползучесть материалов
- 13.Кривая ползучести
- 14.Кривая релаксации напряжений
- 15.Предел ползучести
- 16.Одномерные определяющие уравнения ползучести
- 17.Теория старения
- 18.Теория течения

- 19. Теория упрочнения
- 20. Теория структурных параметров
- 21. Линейная теория наследственности
- 22. Нелинейные теории наследственности

### Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольные вопросы)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки, без ошибок
не зачтено	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки.

### 6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

Основная литература:

1. Казаков Дмитрий Александрович. Моделирование процессов деформирования и разрушения материалов и конструкций : монография / Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского. - Н. Новгород : Изд-во Нижегород. ун-та, 1999. - 226 с. - 20.00., 1 экз.
2. Капустин Сергей Аркадьевич. Метод конечных элементов в задачах механики деформируемых тел : учеб. пособие / Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского. - Н. Новгород : Изд-во Нижегород. гос. ун-та, 2002. - 180 с. - ISBN 5-85746-574-5 : 100.00., 40 экз.

Дополнительная литература:

1. Волков Иван Андреевич. Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями : [монография]. - М. : Физматлит, 2008. - 424 с., 44 табл., 392 ил. - Библиогр.: с. 407 - 422. - ISBN 978-5-9221-0965-9 : 130.00., 1 экз.

Программное обеспечение и Интернет-ресурсы (в соответствии с содержанием дисциплины):

[http://www.mmf.unn.ru/files/2014/01/Kapustin\\_DeformationAndDestructionProcesses.pdf](http://www.mmf.unn.ru/files/2014/01/Kapustin_DeformationAndDestructionProcesses.pdf)

### 7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных образовательной программой, оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран), техническими средствами обучения, компьютерами.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечены доступом в электронную информационно-образовательную среду.

Программа составлена в соответствии с требованиями ОС ННГУ по специальности 01.05.01 -  
Фундаментальные математика и механика.

Автор(ы): Горохов Василий Андреевич, доктор физико-математических наук.

Заведующий кафедрой: Игумнов Леонид Александрович, доктор физико-математических наук.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 13.12.2023, протокол № 3.