

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

Магистратура

---

Направление подготовки / специальность

01.04.03 - Механика и математическое моделирование

---

Направленность образовательной программы

Информационное и программное обеспечение. Инженерия

---

Форма обучения

очная

---

г. Нижний Новгород

2024 год начала подготовки

## 1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.О.07 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
УК-3: Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели	УК-3.1: Знать основные принципы управления командой проекта УК-3.2: Уметь вырабатывать командную стратегию при выполнении проекта УК-3.3: Владеть методами мотивации команды на достижение поставленной цели	УК-3.1: Знать основные закономерности необратимого деформирования и разрушения конструкционных материалов при различных режимах физико-механических воздействий; модели пластичности, ползучести и накопления повреждений.  УК-3.2: Уметь адаптировать жизненный цикл под специфику конкретных проектов.  УК-3.3: Владеть методами управления проектом на всех этапах его жизненного цикла.	Расчетно-графическая работа	Экзамен: Контрольные вопросы
ОПК-2: Способен разрабатывать и применять новые методы математического моделирования в научно-исследовательской и опытно-конструкторской деятельности	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	ОПК-2.1: Знать основные положения, терминологию и методологию в области математического и алгоритмического моделирования.  ОПК-2.2: Уметь выбирать нужную модель деформирования материала для решения	Расчетно-графическая работа	Экзамен: Контрольные вопросы

	основе теоретических знаний в области математических и компьютерных наук ОПК-2.3: Имеет практический опыт разработки новых методов математического моделирования для решения задач профессиональной и научной деятельности	задачи оценки прочности конструкции; получать материальные функции моделей пластичности, ползучести и накопления повреждений.  ОПК-2.3: Владеть опытом разработки новых методов математического моделирования для решения задач ДТТ		
ОПК-3: Способен разрабатывать новые методы экспериментальных исследований и применять современное экспериментальное оборудование в профессиональной деятельности	ОПК-3.1: Знает основные положения, терминологию и методологию в области физического моделирования, а также основы теории эксперимента в механике ОПК-3.2: Умеет выбирать, использовать и разрабатывать необходимые методы физического моделирования и экспериментальных исследований в зависимости от поставленных задач ОПК-3.3: Имеет практический опыт применения методов физического моделирования и современного экспериментального оборудования для решения профессиональных задач	ОПК-3.1: Знать основные положения, терминологию и методологию в области физического моделирования нелинейных моделей деформируемых твердых тел.  ОПК-3.2: Уметь выбирать, использовать и разрабатывать необходимые методы физического моделирования и экспериментальных исследований нелинейных моделей деформируемых твердых тел.  ОПК-3.3: Владеть опытом построения новых математических моделей, для описания закономерностей деформирования материалов в заданных условиях внешних воздействий.	Расчетно-графическая работа	Экзамен: Контрольные вопросы

### 3. Структура и содержание дисциплины

#### 3.1 Трудоемкость дисциплины

	<b>очная</b>
<b>Общая трудоемкость, з.е.</b>	<b>4</b>
<b>Часов по учебному плану</b>	<b>144</b>
в том числе	

<b>аудиторные занятия (контактная работа):</b>	
- занятия лекционного типа	<b>16</b>
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	<b>16</b>
- КСР	<b>2</b>
<b>самостоятельная работа</b>	<b>74</b>
<b>Промежуточная аттестация</b>	<b>36</b> <b>Экзамен</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/ лабора- торные работы), часы	Всего	
	о ф о	о ф о	о ф о	о ф о	о ф о
Введение. Эффекты необратимого поведения конструкционных материалов при различных режимах термосиловых нагружений	13	2	2	4	9
Описание процессов нелинейного деформирования и деградации свойств конструкционных материалов в рамках соотношений механики поврежденной среды	13	2	2	4	9
Основные положения, используемые при построении моделей пластического течения. Модели теории пластического течения	13	2	2	4	9
Проверка адекватности применения моделей термопластичности с комбинированным упрочнением	13	2	2	4	9
Модели, описывающие процессы ползучести и релаксации напряжений в конструкционных материалах при квазистатических термосиловых нагружениях	13	2	2	4	9
Моделирование процессов необратимого деформирования и разрушения материалов в рамках соотношений механики поврежденной среды	13	2	2	4	9
Особенности моделирования процессов деформирования и разрушения материалов при малоцикловых термосиловых нагружениях	14	2	2	4	10
Моделирование процессов многоциклового усталости конструкционных материалов	14	2	2	4	10
Аттестация	36				
КСР	2				2
Итого	144	16	16	34	74

#### 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 термостатических 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 термостатических нагружениях.
8. Моделирование процессов многоциклового 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 УК-3:**

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.
23. Экспериментальная проверка теорий ползучести.
24. Накоплений повреждений в материалах.
25. Основные виды феноменологических моделей накопления повреждений.
26. Модель поврежденного материала.
27. Параметры, характеризующие поврежденность материала.
28. Кинетические уравнения накопления повреждений.
29. Вариант модели пластического деформирования конструкционных материалов.
30. Альтернативный вариант модели пластического деформирования.
31. Модель накопления пластических повреждений.
32. Определение параметров упругости и материальных функций модели пластичности.
33. Вычисление материальных функций модели накопления пластических повреждений.
34. Модель ползучести.
35. Модель накопления повреждений при ползучести.
36. Получение материальных функций модели ползучести.
37. Вычисление материальных функций модели накопления повреждений при ползучести.
38. Закономерности пластического деформирования материалов при малоцикловом нагружении.
39. Кривая малоциклового усталости.
40. Многоцикловая усталость материалов.
41. Параметры, характеризующие цикл нагружения.
42. Предел выносливости.
43. Кривая многоциклового усталости.
44. Уравнения кривых многоциклового усталости.
45. Основные типы моделей многоциклового усталости.
46. Модель малоциклового усталости.
47. Модель многоциклового усталости.
48. Получение материальных функций модели малоциклового усталости.
49. Получение материальных функций модели многоциклового усталости.
50. Особенности деформирования конструкционных материалов в условиях радиационных воздействий.
51. Модели деформирования материалов, эксплуатирующихся в условиях интенсивных терморadiационных воздействий.
52. Модель деформирования нержавеющей сталей при терморadiационных воздействиях.
53. Модель упруговязкопластического деформирования изотропного графита при терморadiационном воздействии.
54. Модель анизотропного графита.
55. Получение материальных функций моделей деформирования материалов при терморadiационном нагружении.
56. Получение материальных функций модели анизотропного графита.
57. Реализация моделей нелинейного деформирования и разрушения материалов в программных средствах численного исследования на основе МКЭ прочности конструкций.
58. Схема метода начальных напряжений.
59. Алгоритм подпрограммы, реализующей физические соотношения на этапе нагружения конструкции.
60. Алгоритм подпрограммы, реализующей внутреннюю шаговую схему в физическом узле конструкции.

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

1. Пластичность

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

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

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

Начальный предел текучести материала описывается соотношением:

$$\sigma_1^0(T) = 115 + 239 \cdot \exp(-0,0022 \cdot (T + 273)). \tag{1.2}$$

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

$$\sigma_{11}(T, \epsilon_{11}^p) = \sigma_1^0(T) + A(T) \cdot \left( \epsilon_{11}^p \right)^{n(T)} \tag{1.3}$$

где

$$A(T) = 1408 - 1.4 \cdot T; \tag{1.4}$$

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

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  $\sigma_{11}(\epsilon_{11})$ , выбрав максимальное значение  $\epsilon_{11}$  из условия  $\epsilon_{11}^e = (0.15 + 0.20) \cdot \epsilon_{11}$  (соответственно  $\epsilon_{11}^p = (0.80 + 0.85) \cdot \epsilon_{11}$ ).
- 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  $g_2$ .

2. Ползучесть

Уравнение для скорости ползучести имеет вид:

$$\dot{\epsilon}^c = a_c \left( \frac{\sigma}{100} \right)^{n_c} \cdot (k_c)^{m_c}, \tag{2.1}$$

где

$$k_c = \begin{cases} \epsilon^c, & \epsilon^c < k_c^{1,2} \\ k_c^{1,2}, & k_c \geq k_c^{1,2} \end{cases} \tag{2.2}$$

Таблица значений параметров ползучести:

Вариант	$a_c, \text{ч}^{-1}$	$n_c$	$m_c$	$k_c^{1,2}$
1	$4.82 \cdot 10^{-13}$	13.5	-1.5	0.039
2	$2.46 \cdot 10^{-9}$	9.5	-0.7	0.055
3	$1.20 \cdot 10^{-7}$	8.2	-0.63	0.069
4	$7.3445 \cdot 10^{-14}$	13.8	-1.5	0.025
5	$1.3433 \cdot 10^{-11}$	12.5	-1.1018	0.031
6	$1.1984 \cdot 10^{-8}$	11.2	-0.6484	0.047

Задание

- 2.1. Пронтегрируйте аналитически уравнение (2.1).
- 2.2. Определите значение радиуса поверхности ползучести  $C_0$  из условия, что накопленная деформация ползучести  $\epsilon^c$  за время  $t = 50000$  часов не превысит 0.001.
- 2.3. Постройте кривую ползучести  $\epsilon^c(t)$  для напряжения  $\sigma$ , соответствующего значению параметра  $\theta = 3$  (таблица и график,  $t$  - время (часы)), выбрав в качестве  $\epsilon^c \max$  значение  $k_c^{1,2}$ .
- 2.4. Вычислите значения функций  $L(\theta)$  ( $\theta = 0; 0.5; 1.0; 1.5; 2.0; 2.5; 3.0$ ) и  $H_0(k_c)$  ( $k_c = k_c^{\min}; k_c^{\min} + \Delta k_c; \dots; k_c^{1,2}; \Delta k_c = \frac{k_c^{1,2} - k_c^{\min}}{10}$ ,  $k_c^{\min}$  выбирается из условия  $\frac{H_0(k_c^{1,2})}{H_0(k_c^{\min})} = 0.01$ ).

5.1.3 Типовые задания (оценочное средство - Расчетно-графическая работа) для оценки сформированности компетенции ОПК-3:

1. Пластичность

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

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

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

Начальный предел текучести материала описывается соотношением:

$$\sigma_1^0(T) = 115 + 239 \cdot \exp(-0,0022 \cdot (T + 273)). \tag{1.2}$$

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

$$\sigma_{11}(T, \epsilon_{11}^p) = \sigma_1^0(T) + A(T) \cdot \left( \epsilon_{11}^p \right)^{n(T)} \tag{1.3}$$

где

$$A(T) = 1408 - 1,4 \cdot T \tag{1.4}$$
$$n(T) = 0,7 \cdot \left( \frac{A}{1000} \right)^{0,4} \tag{1.5}$$

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  $\sigma_{11}(\epsilon_{11})$ , выбрав максимальное значение  $\epsilon_{11}$  из условия  $\epsilon_{11}^s = (0,15 + 0,20) \cdot \epsilon_{11}$  (соответственно  $\epsilon_{11}^p = (0,80 + 0,85) \cdot \epsilon_{11}$ ).

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  $g_2$ .

2. Ползучесть

Уравнение для скорости ползучести имеет вид:

$$\dot{\epsilon}^c = a_c \left( \frac{\sigma}{100} \right)^{n_c} \cdot (k_c)^{m_c}, \text{ ч}^{-1} \tag{2.1}$$

где

$$k_c = \begin{cases} \epsilon^c, & \epsilon^c < k_c^{1,2} \\ k_c^{1,2}, & k_c \geq k_c^{1,2} \end{cases} \tag{2.2}$$



Таблица значений параметров ползучести:				
Вариант	$a_c, \text{ч}^{-1}$	$b_c$	$m_c$	$k_c^{1,2}$
1	$4.82 \cdot 10^{-13}$	13.5	-1.5	0.039
2	$2.46 \cdot 10^{-9}$	9.5	-0.7	0.055
3	$1.20 \cdot 10^{-7}$	8.2	-0.63	0.069
4	$7.3445 \cdot 10^{-14}$	13.8	-1.5	0.025
5	$1.3433 \cdot 10^{-11}$	12.5	-1.1018	0.031
6	$1.1984 \cdot 10^{-8}$	11.2	-0.6484	0.047

Задание

2.1.Принтегрируйте аналитически уравнение (2.1).

2.2.Определите значение радиуса поверхности ползучести  $C_0$  из условия, что накопленная деформация ползучести  $e^c$  за время  $t = 50000$  часов не превысит 0.001.

2.3.Постройте кривую ползучести  $e^c(t)$  для напряжения  $\sigma$ , соответствующего значению параметра  $\theta = 3$  (таблица и график,  $t$  - время (часы)), выбрав в качестве  $e^{c \max}$  значение  $k_c^{1,2}$ .

2.4.Вычислите значения функций  $L(\theta)$  ( $\theta = 0, 0.5; 1.0; 1.5; 2.0; 2.5; 3.0$ ) и  $H_0(k_c)$  ( $k_c = k_c^{\min}; k_c^{\min} + \Delta k_c; \dots; k_c^{1,2}$ ,  $\Delta k_c = \frac{k_c^{1,2} - k_c^{\min}}{10}$ ,  $k_c^{\min}$  выбирается из условия  $\frac{H_0(k_c^{1,2})}{H_0(k_c^{\min})} = 0.01$ ).

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

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

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

### Шкала оценивания сформированности компетенций

Уровень сформированности компетенций (индикатор достижения компетенций)	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
	не зачтено			зачтено			
Знания	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа	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	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Ошибок нет.	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.

	обучающегося от ответа			негрубых ошибок	несущественных ошибок		
<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	Продemonстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами.	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с отдельными несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме	Продemonстрированы 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 вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки	Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми недочетами	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми недочетами	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов	Продemonстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов	Продemonстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

### Шкала оценивания при промежуточной аттестации

Оценка		Уровень подготовки
зачтено	превосходно	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
	отлично	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично».
	очень хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо»
	хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо».
	удовлетворительно	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	неудовлетворительно	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно».
	плохо	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 УК-3**

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.
23. Экспериментальная проверка теорий ползучести.
24. Накопления повреждений в материалах.
25. Основные виды феноменологических моделей накопления повреждений.
26. Модель поврежденного материала.
27. Параметры, характеризующие поврежденность материала.
28. Кинетические уравнения накопления повреждений.
29. Вариант модели пластического деформирования конструкционных материалов.
30. Альтернативный вариант модели пластического деформирования.
31. Модель накопления пластических повреждений.
32. Определение параметров упругости и материальных функций модели пластичности.
33. Вычисление материальных функций модели накопления пластических повреждений.
34. Модель ползучести.
35. Модель накопления повреждений при ползучести.
36. Получение материальных функций модели ползучести.
37. Вычисление материальных функций модели накопления повреждений при ползучести.
38. Закономерности пластического деформирования материалов при малоцикловом нагружении.
39. Кривая малоциклового усталости.
40. Многоцикловая усталость материалов.
41. Параметры, характеризующие цикл нагружения.
42. Предел выносливости.
43. Кривая многоциклового усталости.
44. Уравнения кривых многоциклового усталости.

45. Основные типы моделей многоциклового усталости.
46. Модель малоциклового усталости.
47. Модель многоциклового усталости.
48. Получение материальных функций модели малоциклового усталости.
49. Получение материальных функций модели многоциклового усталости.
50. Особенности деформирования конструкционных материалов в условиях радиационных воздействий.
51. Модели деформирования материалов, эксплуатирующихся в условиях интенсивных терморadiационных воздействий.
52. Модель деформирования нержавеющей сталей при терморadiационных воздействиях.
53. Модель упруговязкопластического деформирования изотропного графита при терморadiационном воздействии.
54. Модель анизотропного графита.
55. Получение материальных функций моделей деформирования материалов при терморadiационном нагружении.
56. Получение материальных функций модели анизотропного графита.
57. Реализация моделей нелинейного деформирования и разрушения материалов в программных средствах численного исследования на основе МКЭ прочности конструкций.
58. Схема метода начальных напряжений.
59. Алгоритм подпрограммы, реализующей физические соотношения на этапе нагружения конструкции.
60. Алгоритм подпрограммы, реализующей внутреннюю шаговую схему в физическом узле конструкции.

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

#### 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:

$$\sigma_1^0(T) = 115 + 239 \cdot \exp(-0,0022 \cdot (T + 273)). \quad (1.2)$$

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

$$\sigma_{11}(T, \epsilon_{11}^p) = \sigma_1^0(T) + A(T) \cdot \left( \epsilon_{11}^p \right)^{n(T)} \quad (1.3)$$

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  $\sigma_{11}(\epsilon_{11})$ , выбрав максимальное значение  $\epsilon_{11}$  из условия  $\epsilon_{11}^I = (0.15 + 0.20) \cdot \epsilon_{11}$  (соответственно  $\epsilon_{11}^{II} = (0.80 + 0.85) \cdot \epsilon_{11}$ ).
- 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  $g_2$ .

#### 2. Ползучесть

Уравнение для скорости ползучести имеет вид:

$$\dot{\epsilon}^c = a_c \left( \frac{\sigma}{100} \right)^{n_c} \cdot (k_c)^{m_c}, \quad \text{ч}^{-1} \quad (2.1)$$

где

$$k_c = \begin{cases} \epsilon^c, & \epsilon^c < k_c^{1,2} \\ k_c^{1,2}, & k_c \geq k_c^{1,2} \end{cases} \quad (2.2)$$

Таблица значений параметров ползучести:

Вариант	$a_c, \text{ч}^{-1}$	$n_c$	$m_c$	$k_c^{1,2}$
1	$4.82 \cdot 10^{-13}$	13.5	-1.5	0.039
2	$2.46 \cdot 10^{-9}$	9.5	-0.7	0.055
3	$1.20 \cdot 10^{-7}$	8.2	-0.63	0.069
4	$7.3445 \cdot 10^{-14}$	13.8	-1.5	0.025
5	$1.3433 \cdot 10^{-11}$	12.5	-1.1018	0.031
6	$1.1984 \cdot 10^{-8}$	11.2	-0.6484	0.047

Задание

- 2.1. Пронтегрируйте аналитически уравнение (2.1).
- 2.2. Определите значение радиуса поверхности ползучести  $C_0$  из условия, что накопленная деформация ползучести  $\epsilon^c$  за время  $t = 50000$  часов не превысит 0.001.
- 2.3. Постройте кривую ползучести  $\epsilon^c(t)$  для напряжения  $\sigma$ , соответствующего значению параметра  $\theta = 3$  (таблица и график,  $t$  - время (часы)), выбрав в качестве  $\epsilon^{c \max}$  значение  $k_c^{1,2}$ .
- 2.4. Вычислите значения функций  $L(\theta)$  ( $\theta = 0; 0.5; 1.0; 1.5; 2.0; 2.5; 3.0$ ) и  $H_0(k_c)$  ( $k_c = k_c^{\min}; k_c^{\min} + \Delta k_c; \dots; k_c^{1,2}$ ,  $\Delta k_c = \frac{k_c^{1,2} - k_c^{\min}}{10}$ ,  $k_c^{\min}$  выбирается из условия  $\frac{H_0(k_c^{1,2})}{H_0(k_c^{\min})} = 0.01$ ).

## 5.3.3 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ОПК-3

#### 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:

$$\sigma_0^0(T) = 115 + 239 \cdot \exp(-0.0022 \cdot (T + 273)). \quad (1.2)$$

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

$$\sigma_{11}(T, \epsilon_{11}^p) = \sigma_0^0(T) + A(T) \cdot \left( \epsilon_{11}^p \right)^{n(T)} \quad (1.3)$$

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  $\sigma_{11}(\epsilon_{11})$ , выбрав максимальное значение  $\epsilon_{11}$  из условия  $\epsilon_{11}^t = (0.15 + 0.20) \cdot \epsilon_{11}$  (соответственно  $\epsilon_{11}^t = (0.80 + 0.85) \cdot \epsilon_{11}$ ).
- 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  $g_2$ .

2. Ползучесть

Уравнение для скорости ползучести имеет вид:

$$\dot{\epsilon}^c = a_c \left( \frac{\sigma}{100} \right)^{n_c} \cdot (k_c)^{m_c} \cdot \eta^{-1} \quad (2.1)$$

где

$$k_c = \begin{cases} \epsilon^c, & \epsilon^c < k_c^{1,2} \\ k_c^{1,2}, & k_c \geq k_c^{1,2} \end{cases} \quad (2.2)$$

Таблица значений параметров ползучести:

Вариант	$a_c, \eta^{-1}$	$n_c$	$m_c$	$k_c^{1,2}$
1	$4.82 \cdot 10^{-13}$	13.5	-1.5	0.039
2	$2.46 \cdot 10^{-9}$	9.5	-0.7	0.055
3	$1.20 \cdot 10^{-7}$	8.2	-0.63	0.069
4	$7.3445 \cdot 10^{-14}$	13.8	-1.5	0.025
5	$1.3433 \cdot 10^{-11}$	12.5	-1.1018	0.031
6	$1.1984 \cdot 10^{-8}$	11.2	-0.6484	0.047

Задание

- 2.1. Пронтегрируйте аналитически уравнение (2.1).
- 2.2. Определите значение радиуса поверхности ползучести  $C_0$  из условия, что накопленная деформация ползучести  $\epsilon^c$  за время  $t = 50000$  часов не превысит 0.001.
- 2.3. Постройте кривую ползучести  $\epsilon^c(t)$  для напряжения  $\sigma$ , соответствующего значению параметра  $\theta = 3$  (таблица и график,  $t$  - время (часы)), выбрав в качестве  $\epsilon^{c \max}$  значение  $k_c^{1,2}$ .
- 2.4. Вычислите значения функций  $L(\theta)$  ( $\theta = 0; 0.5; 1.0; 1.5; 2.0; 2.5; 3.0$ ) и  $H_0(k_c)$  ( $k_c = k_c^{\min}; k_c^{\min} + \Delta k_c; \dots; k_c^{1,2}$ ,  $\Delta k_c = \frac{k_c^{1,2} - k_c^{\min}}{10}$ ,  $k_c^{\min}$  выбирается из условия

$$\frac{H_0(k_c^{1,2})}{H_0(k_c^{\min})} = 0.01).$$

Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольные вопросы)

Оценка	Критерии оценивания
превосходно	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.
отлично	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки, без ошибок.
очень хорошо	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок.
хорошо	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок.
удовлетворительно	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибок.
неудовлетворительно	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые

Оценка	Критерии оценивания
	ошибки.
плохо	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа.

## 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 направлению подготовки/специальности 01.04.03 - Механика и математическое моделирование.

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.

