

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

(факультет / институт / филиал)

УТВЕРЖДЕНО  
решением Ученого совета ННГУ  
протокол от «16» июня 2021 г. № 8

**Рабочая программа дисциплины**

Нелинейные модели деформируемых твердых тел

(наименование дисциплины (модуля))

Уровень высшего образования

специалитет

(бакалавриат / магистратура / специалитет)

Направление подготовки / специальность

01.05.01 Фундаментальные математика и механика

(указывается код и наименование направления подготовки / специальности)

Направленность образовательной программы

Фундаментальная механика и приложения

(указывается профиль / магистерская программа / специализация)

Форма обучения

очная

(очная / очно-заочная / заочная)

Нижний Новгород

2021 год

## 1. Место дисциплины в структуре ООП

Дисциплина относится к обязательной части.

№ варианта	Место дисциплины в учебном плане образовательной программы	Стандартный текст для автоматического заполнения в конструкторе РПД
1	Блок 1. Дисциплины (модули) Обязательная часть	Дисциплина Б1.О.24.05, «Нелинейные модели деформируемых твердых тел» относится к обязательной части ООП специальность 01.05.01 Фундаментальные математика и механика

## 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**	
<b>ОПК-1.</b> Способен находить, формулировать и решать актуальные и значимые проблемы фундаментальной математики и механики	<b>ОПК-1.1. Знает</b> основы фундаментальных физико-математических дисциплин и других естественных наук. <b>ОПК-1.2. Умеет</b> формулировать, анализировать и решать профессиональные задачи с применением фундаментальных знаний математики, физики и других естественных наук. <b>ОПК-1.3. Имеет практический опыт</b> постановки и решения актуальных задач математики и механики.	<b>Знать</b> - основные закономерности необратимого деформирования и разрушения конструкционных материалов при различных режимах физико-механических воздействий; - модели пластичности, ползучести и накопления повреждений.	Собеседование

### 3. Структура и содержание дисциплины

#### 3.1. Трудоемкость дисциплины

	<b>очная форма обучения</b>
<b>Общая трудоемкость</b>	<b>4 ЗЕТ</b>
<b>Часов по учебному плану</b>	<b>144</b>
<b>в том числе</b>	
<b>аудиторные занятия (контактная работа):</b>	<b>33</b>
- занятия лекционного типа	<b>16</b>
- занятия семинарского типа	<b>16</b>
- КСР	<b>1</b>
<b>самостоятельная работа</b>	<b>111</b>
<b>Промежуточная аттестация – зачет</b>	

#### 3.2. Содержание дисциплины

Очная форма обучения						
Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	в том числе				Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы				
		из них				
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Всего	
Введение. Эффекты необратимого поведения конструкционных материалов при различных режимах термосиловых нагрузений	18	2	2			12
Описание процессов нелинейного деформирования и деградации свойств конструкционных материалов в рамках соотношений механики поврежденной среды	18	2	2			14
Основные положения, используемые при построении моделей пластического течения. Модели теории пластического течения.	18	2	2			14
Проверка адекватности применения моделей термопластичности с комбинированным упрочнением	18	2	2			12
Модели, описывающие процессы ползучести и релаксации напряжений в конструкционных материалах при квазистатических термосиловых нагрузениях	18	2	2			12
Моделирование процессов необратимого деформирования и разрушения материалов в рамках соотношений механики поврежденной среды	18	2	2			12

Очная форма обучения						
Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	в том числе				Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы				
		из них				
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Всего	
Особенности моделирования процессов деформирования и разрушения материалов при малоцикловых термосиловых нагружениях	24	2	2			16
Моделирование процессов многоцикловой усталости конструкционных материалов	24	2	2			18
Текущий контроль – 1 часа						
Промежуточная аттестация – зачет						
Итого	144	16	16			111

Текущий контроль успеваемости реализуется в рамках занятий семинарского типа.  
Промежуточная аттестация проходит в форме зачет.

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

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.

Для успешного выполнения самостоятельной работы в наличии имеются компьютерный класс с установленными на компьютеры стандартными офисными пакетами, средствами разработки программ.

Контрольные вопросы и задания для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины приведены в п. 5.2.

#### 5. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)

Фонд оценочных средств включает: контрольные материалы для проведения текущего контроля в форме расчетно-графической работы и промежуточной аттестации в форме вопросов и задач к зачету.

##### 5.1. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине

Шкала оценивания сформированности компетенций		Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций)		
		Знания	Умения	Навыки
плохо	не	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний	Отсутствие минимальных умений. Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа	Отсутствие владения материалом. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа

Шкала оценивания сформированности компетенций		Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций)		
		Знания	Умения	Навыки
		вследствие отказа обучающегося от ответа	обучающегося от ответа	обучающегося от ответа
<b>неудовлетворительно</b>		Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки.	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки.	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки.
<b>удовлетворительно</b>		Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибок.	Продemonстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме.	Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми недочетами
<b>хорошо</b>	<b>зачтено</b>	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами.	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.
<b>очень хорошо</b>		Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами.	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов.
<b>отлично</b>		Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки, без ошибок.	Продemonстрированы все основные умения, решены все основные задачи с отдельными несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме.	Продemonстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов.
<b>превосходно</b>		Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов	Продemonстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

### Шкала оценки при промежуточной аттестации

Оценка		Уровень подготовки
<b>зачтено</b>	<b>превосходно</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно»
	<b>отлично</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «отлично»
	<b>очень хорошо</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «очень хорошо»

Оценка		Уровень подготовки
	хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «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»
незачтено	неудовлетворительно	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно», ни одна из компетенций не сформирована на уровне «плохо»
	плохо	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

## 5.2. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения

### 5.2.1. Контрольные вопросы

Вопросы	Код формируемой компетенции
Основные закономерности упругопластического деформирования материалов	ОПК-1
Деформирование материалов в условиях одноосного сжатия	ОПК-1
Эффект Баушингера	ОПК-1
Влияние на диаграмму упругопластического деформирования материала условий испытания	ОПК-1
Условие текучести Мизеса	ОПК-1
Поверхность текучести	ОПК-1
Изотропное упрочнение	ОПК-1
Кинематическое упрочнение	ОПК-1
Комбинированное упрочнение	ОПК-1
Теория пластического течения	ОПК-1
Деформационная теория пластичности	ОПК-1
Ползучесть материалов	ОПК-1
Кривая ползучести	ОПК-1
Кривая релаксации напряжений	ОПК-1
Предел ползучести	ОПК-1
Одномерные определяющие уравнения ползучести	ОПК-1
Теория старения	ОПК-1
Теория течения	ОПК-1
Теория упрочнения	ОПК-1
Теория структурных параметров	ОПК-1
Линейная теория наследственности	ОПК-1
Нелинейные теории наследственности	ОПК-1
Экспериментальная проверка теорий ползучести	ОПК-1
Накоплений повреждений в материалах	ОПК-1
Основные виды феноменологических моделей накопления повреждений	ОПК-1
Модель поврежденного материала	ОПК-1
Параметры, характеризующие поврежденность материала	ОПК-1
Кинетические уравнения накопления повреждений	ОПК-1
Вариант модели пластического деформирования конструкционных материалов	ОПК-1
Альтернативный вариант модели пластического деформирования	ОПК-1
Модель накопления пластических повреждений	ОПК-1
Определение параметров упругости и материальных функций модели пластичности	ОПК-1

Вопросы	Код формируемой компетенции
Вычисление материальных функций модели накопления пластических повреждений	ОПК-1
Модель ползучести	ОПК-1
Модель накопления повреждений при ползучести	ОПК-1
Получение материальных функций модели ползучести	ОПК-1
Вычисление материальных функций модели накопления повреждений при ползучести	ОПК-1
Закономерности пластического деформирования материалов при малоцикловом нагружении	ОПК-1
Кривая малоциклового усталости	ОПК-1
Многоцикловая усталость материалов	ОПК-1
Параметры, характеризующие цикл нагружения	ОПК-1
Предел выносливости	ОПК-1
Кривая многоциклового усталости	ОПК-1
Уравнения кривых многоциклового усталости	ОПК-1
Основные типы моделей многоциклового усталости	ОПК-1
Модель малоциклового усталости	ОПК-1
Модель многоциклового усталости	ОПК-1
Получение материальных функций модели малоциклового усталости	ОПК-1
Получение материальных функций модели многоциклового усталости	ОПК-1
Особенности деформирования конструкционных материалов в условиях радиационных воздействий	ОПК-1
Модели деформирования материалов, эксплуатирующихся в условиях интенсивных терморadiационных воздействий	ОПК-1
Модель деформирования нержавеющей сталей при терморadiационных воздействиях	ОПК-1
Модель упруговязкопластического деформирования изотропного графита при терморadiационном воздействии	ОПК-1
Модель анизотропного графита	ОПК-1
Получение материальных функций моделей деформирования материалов при терморadiационном нагружении	ОПК-1
Получение материальных функций модели анизотропного графита	ОПК-1
Реализация моделей нелинейного деформирования и разрушения материалов в программных средствах численного исследования на основе МКЭ прочности конструкций	ОПК-1
Схема метода начальных напряжений	ОПК-1
Алгоритм подпрограммы, реализующей физические соотношения на этапе нагружения конструкции	ОПК-1
Алгоритм подпрограммы, реализующей внутреннюю шаговую схему в физическом узле конструкции	ОПК-1

## 5.2.2. Типовые расчетно-графические работы 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  $g_2$ .

## 2. Ползучесть

Уравнение для скорости ползучести имеет вид:

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

где

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

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

### 5.2.3. Типовые расчетно-графические работы для оценки сформированности компетенции ОПК-1

#### 3. Многоцикловая усталость

Уравнение кривой многоцикловой усталости имеет вид  $\sigma_a = a \lg N_f + b$  ( $\sigma_a$  – амплитуда напряжений в цикле;  $N_f$  – число циклов до разрушения).

Вариант	$a$	$b$	$r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$
1	-2.5083	44.773	-1.0
2	-2.3518	43.249	-0.9
3	-2.1766	41.621	-0.8
4	-2.0223	40.488	-0.7
5	-1.9541	39.602	-0.6
6	-1.9080	38.959	-0.5

Модуль нормальной упругости материала  $E = 4805 \text{ кг/мм}^2$ , коэффициент поперечной деформации  $\nu = 0.3$ .

Пусть определяющее соотношение модели многоцикловой усталости имеет вид

$$N_f \cdot 10^{k\sqrt{W_4}} = C, \quad (3.1)$$

где  $W_4 = \langle \int_{\text{цикл}} \sigma'_{ij} de'_{ij} \rangle$ .

### Задание

3.1. Постройте кривую многоциклового усталости в координатах  $\lg N_f, \sigma_a$  в диапазоне  $N_f = 5 \cdot 10^4 \div 5 \cdot 10^7$  циклов.

3.2. Определите параметры  $k$  и  $C$  модели многоциклового усталости (3.1) ( $N_{f1} = 10^5; N_{f2} = 10^7$ ).

На основе соотношения (3.1) вычислите число циклов до разрушения  $N_f$  для амплитуды напряжений, соответствующей  $10^6$  циклов до разрушения на кривой многоциклового усталости.

### 6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

№	а) основная литература:	К-во
1.	Казаков Д.А., Капустин С.А., Коротких Ю.Г. Моделирование процессов деформирования и разрушения материалов и конструкций // Монография. Изд-во Нижегородского ун-та. Н.Новгород, 1999. 226 с.	1
2.	Капустин С.А. Метод конечных элементов в задачах механики деформируемых тел // Учебное пособие. Н.Новгород, 2002 г., 180 с.	40

№	б) дополнительная литература:	К-во
1.	Волков И.А., Коротких Ю.Г. Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями // М.: Физматлит, 2008. 424 с.	1
2.	Капустин С.А., Чурилов Ю.А., Горохов В.А. Методические основы и алгоритмы компьютерного моделирования процессов деформирования и разрушения материалов и конструкций при квазистатических термосиловых нагружения // Учебно-методическое пособие. Н. Новгород, 2014. 111 с.	0

№	в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы (в соответствии с содержанием дисциплины)	«Л» и «С»
1.	<a href="http://www.mmf.unn.ru/files/2014/01/Kapustin_DeformationAndDestructionProcesses.pdf">http://www.mmf.unn.ru/files/2014/01/Kapustin_DeformationAndDestructionProcesses.pdf</a>	С

### 7. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Помещения представляют собой учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных программой, оснащенные оборудованием и техническими средствами обучения – компьютерная техника со стандартными офисными пакетами, средствами разработки программ.

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 01.05.01  
Фундаментальные математика и механика.

Программа одобрена на заседании методической комиссии института информационных технологий, математики и механики  
от 2 июня 2021 года, протокол № 8.

Автор

д.ф.-м.н., доцент кафедры ТКиЭМ

В.А. Горохов

Рецензент(ы) \_\_\_\_\_  
Заведующий кафедрой ТКиЭМ

д.ф.-м.н., проф.

Л.А. Игумнов