

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
от 30.11.2022 г. протокол № 13

Рабочая программа дисциплины

Нелинейные модели деформируемых твердых тел

(наименование дисциплины (модуля))

Уровень высшего образования

магистратура

(бакалавриат / магистратура / специалитет)

Направление подготовки / специальность

01.04.03 Механика и математическое моделирование

(указывается код и наименование направления подготовки / специальности)

Направленность образовательной программы

Информационное и программное обеспечение. Инженерия

(указывается профиль / магистерская программа / специализация)

Форма обучения

очная

(очная / очно-заочная / заочная)

Нижегород

2023 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 <i>Б1.О.07, Нелинейные модели деформируемых твердых тел</i> относится к обязательной части ООП направления подготовки 01.04.03 Механика и математическое моделирование.

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**	
УК-3. Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели	УК-2.1. Знать структуру жизненного цикла проекта. УК-2.2. Уметь адаптировать жизненный цикл под специфику конкретных проектов. УК-2.3. Владеть методами управления проектом на всех этапах его жизненного цикла.	Знать - основные закономерности необратимого деформирования и разрушения конструкционных материалов при различных режимах физико-механических воздействий; - модели пластичности, ползучести и накопления повреждений.	Собеседование
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 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	Знать основные положения, терминологию и методологию в области математического и алгоритмического моделирования Уметь: - выбирать нужную модель деформирования материала для решения задачи оценки прочности конструкции; - получать материальные функции моделей пластичности, ползучести и накопления повреждений. Владеть опытом разработки новых методов математического моделирования для решения задач ДТТ	Расчетно-графическая работа
ОПК-3. Способен разрабатывать новые методы экспериментальных	ОПК-3.1. Знает основные положения, терминологию и методологию в области физического моделирования,	Знать основные положения, терминологию и методологию в области физического моделирования нелинейных моделей	Расчетно-графическая работа

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**	
исследований и применять современное экспериментальное оборудование в профессиональной деятельности	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.	деформируемых твердых тел Уметь выбирать, использовать и разрабатывать необходимые методы физического моделирования и экспериментальных исследований нелинейных моделей деформируемых твердых тел Владеть опытом: построения новых математических моделей, для описания закономерностей деформирования материалов в заданных условиях внешних воздействий.	

3. Структура и содержание дисциплины

3.1. Трудоемкость дисциплины

	очная форма обучения
Общая трудоемкость	4 ЗЕТ
Часов по учебному плану	144
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	34
- занятия лекционного типа	16
- занятия семинарского типа	16
- КСР	2
самостоятельная работа	74
Промежуточная аттестация – экзамен	36

3.2. Содержание дисциплины

Очная форма обучения						
Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	в том числе				
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы				Самостоятельная работа обучающегося, часы
		из них				
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Всего	
Введение. Эффекты необратимого поведения конструкционных материалов при различных режимах термосиловых нагружений	13	2	2		4	9

Очная форма обучения						
Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	в том числе				
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы				Самостоятельная работа обучающегося, часы
		из них				
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Всего	
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 многоцикловой усталости конструкционных материалов	14	2	2		4	10
Текущий контроль	2				2	
Промежуточная аттестация – экзамен	36					
Итого	144	16	16		34	74

Практические занятия (семинарские занятия /лабораторные работы) организуются, в том числе в форме практической подготовки, которая предусматривает участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью.

На проведение практических занятий (семинарских занятий /лабораторных работ) в форме практической подготовки отводится 16 часов.

Практическая подготовка направлена на формирование и развитие:

- практических навыков в соответствии с профилем ОП: построения новых математических моделей, для описания закономерностей деформирования материалов в заданных условиях внешних воздействий.

- компетенций - УК-3, ОПК-2, ОПК-3.

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

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 экзамену.

5.1. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине

Шкала оценивания сформированности компетенций		Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций)		
		<u>Знания</u>	<u>Умения</u>	<u>Навыки</u>
плохо	не зачтено	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа	Отсутствие минимальных умений. Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа	Отсутствие владения материалом. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа
неудовлетворительно		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.
удовлетворительно	зачтено	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
хорошо		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.
очень хорошо		Уровень знаний в объеме, соответствующем	Продemonстрированы все основные умения.	Продemonстрированы базовые навыки при

Шкала оценивания сформированности компетенций	Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций)		
	Знания	Умения	Навыки
	программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок	Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами.	решении стандартных задач без ошибок и недочетов.
отлично	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.
превосходно	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
зачтено	превосходно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно»
	отлично	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»
	очень хорошо	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»
	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	УК-3
Деформирование материалов в условиях одноосного сжатия	УК-3
Эффект Баушингера	УК-3
Влияние на диаграмму упругопластического деформирования материала условий	УК-3

Вопросы	Код формируемой компетенции
испытания	
Условие текучести Мизеса	УК-3
Поверхность текучести	УК-3
Изотропное упрочнение	УК-3
Кинематическое упрочнение	УК-3
Комбинированное упрочнение	УК-3
Теория пластического течения	УК-3
Деформационная теория пластичности	УК-3
Ползучесть материалов	УК-3
Кривая ползучести	УК-3
Кривая релаксации напряжений	УК-3
Предел ползучести	УК-3
Одномерные определяющие уравнения ползучести	УК-3
Теория старения	УК-3
Теория течения	УК-3
Теория упрочнения	УК-3
Теория структурных параметров	УК-3
Линейная теория наследственности	УК-3
Нелинейные теории наследственности	УК-3
Экспериментальная проверка теорий ползучести	УК-3
Накоплений повреждений в материалах	УК-3
Основные виды феноменологических моделей накопления повреждений	УК-3
Модель поврежденного материала	УК-3
Параметры, характеризующие поврежденность материала	УК-3
Кинетические уравнения накопления повреждений	УК-3
Вариант модели пластического деформирования конструкционных материалов	УК-3
Альтернативный вариант модели пластического деформирования	УК-3
Модель накопления пластических повреждений	УК-3
Определение параметров упругости и материальных функций модели пластичности	УК-3
Вычисление материальных функций модели накопления пластических повреждений	УК-3
Модель ползучести	УК-3
Модель накопления повреждений при ползучести	УК-3
Получение материальных функций модели ползучести	УК-3
Вычисление материальных функций модели накопления повреждений при ползучести	УК-3
Закономерности пластического деформирования материалов при малоцикловом нагружении	УК-3
Кривая малоциклового усталости	УК-3
Многоцикловая усталость материалов	УК-3
Параметры, характеризующие цикл нагружения	УК-3
Предел выносливости	УК-3
Кривая многоциклового усталости	УК-3
Уравнения кривых многоциклового усталости	УК-3
Основные типы моделей многоциклового усталости	УК-3
Модель малоциклового усталости	УК-3
Модель многоциклового усталости	УК-3
Получение материальных функций модели малоциклового усталости	УК-3
Получение материальных функций модели многоциклового усталости	УК-3
Особенности деформирования конструкционных материалов в условиях радиационных воздействий	УК-3

Вопросы	Код формируемой компетенции
Модели деформирования материалов, эксплуатирующихся в условиях интенсивных терморadiационных воздействий	УК-3
Модель деформирования нержавеющей сталей при терморadiационных воздействиях	УК-3
Модель упруговязкопластического деформирования изотропного графита при терморadiационном воздействии	УК-3
Модель анизотропного графита	УК-3
Получение материальных функций моделей деформирования материалов при терморadiационном нагружении	УК-3
Получение материальных функций модели анизотропного графита	УК-3
Реализация моделей нелинейного деформирования и разрушения материалов в программных средствах численного исследования на основе МКЭ прочности конструкций	УК-3
Схема метода начальных напряжений	УК-3
Алгоритм подпрограммы, реализующей физические соотношения на этапе нагружения конструкции	УК-3
Алгоритм подпрограммы, реализующей внутреннюю шаговую схему в физическом узле конструкции	УК-3

5.2.2. Типовые расчетно-графические работы для оценки сформированности компетенции ОПК-2, 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:

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

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 σ , 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-3

3. Многоцикловая усталость

Уравнение кривой многоцикловой усталости имеет вид $\sigma_a = a \lg N_f + b$ (σ_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 многоциклового усталости имеет вид

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

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

Задание

3.1. Постройте кривую многоциклового усталости в координатах $\lg N_f, \sigma_a$ в диапазоне

$$N_f = 5 \cdot 10^4 \div 5 \cdot 10^7 \text{ циклов.}$$

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:

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 экз.)
2. Капустин С.А. Метод конечных элементов в задачах механики деформируемых тел // Учебное пособие. Н.Новгород, 2002 г., 180 с. (40экз.)

б) дополнительная литература:

1. Волков И.А., Коротких Ю.Г. Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями // М.: Физматлит, 2008. 424 с. (1 экз.)

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы

(в соответствии с содержанием дисциплины)

http://www.mmfm.unn.ru/files/2014/01/Kapustin_DeformationAndDestructionProcesses.pdf

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 по направлению 01.04.03 Механика и математическое моделирование.

Автор д.ф.-м.н., доцент кафедры ТКиЭМ В.А. Горохов

Заведующий кафедрой ТКиЭМ д.ф.-м.н., профессор Л.А. Игумнов

Программа одобрена на заседании методической комиссии института информационных технологий, математики и механики
от 30.11.2022 года, протокол № 3.