

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
«___» _____ 20__ г. № ___

Рабочая программа дисциплины

Модели деформируемых твёрдых тел

(наименование дисциплины (модуля))

Уровень высшего образования

бакалавриат

(бакалавриат / магистратура / специалитет)

Направление подготовки / специальность

01.03.03 Механика и математическое моделирование

(указывается код и наименование направления подготовки / специальности)

Направленность образовательной программы

Математическое моделирование и компьютерный инжиниринг

(указывается профиль / магистерская программа / специализация)

Форма обучения

очная

(очная / очно-заочная / заочная)

Нижний Новгород

2021 год

1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Модели деформируемых твёрдых тел» относится к обязательным 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.19, «Модели деформируемых твёрдых тел» относится к обязательной части ООП направления подготовки 01.03.03 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**	
ОПК-2	ОПК-2.1.	Знает основные положения, терминологию и методологию в области математического и алгоритмического моделирования	Собеседование
	ОПК-2.2.	Умеет осуществлять анализ и выбор методов решения задач профессиональной деятельности на основе теоретических знаний в области математических и компьютерных наук	Контрольная работа
	ОПК-2.3.	Владеет навыками применения базовых знаний в области математического и алгоритмического моделирования, а также современный математический аппарат при решении задач профессиональной деятельности	Сообщение
ОПК-5	ОПК-5.1.	Знает основы преподавания физико-математических дисциплин и информатики в средней школе и специальных учебных заведениях.	Собеседование
	ОПК-5.2.	Умеет использовать полученные фундаментальные и специальные знания в области физико-математических наук в преподавательской деятельности.	Контрольная работа
	ОПК-5.3.	Владеет навыками планирования и подготовки учебных занятий, а также представления научных знаний.	Сообщение

3. Структура и содержание дисциплины

3.1. Трудоемкость дисциплины

	очная форма обучения
Общая трудоемкость	4 з.е.
Часов по учебному плану	144
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	
- занятия лекционного типа	32
- занятия семинарского типа	32
- занятия лабораторного типа	
- текущий контроль (КСР)	2
самостоятельная работа	42
Промежуточная аттестация – экзамен	36

3.2. Содержание дисциплины

Очная форма обучения							
№	Наименование разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	в том числе				СР ¹ , часы
			Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы				
			из них				
			ЗЛеТ ²	ЗСеТ ³	ЗЛаТ ⁴	Всего	
1.	Введение	4	2			2	2
2.	Основания МДТТ	30	8	12		20	10
3.	Линейная теория упругости	28	8	10		18	10
4.	Изотропное линейное термоупругое тело	26	8	8		16	10
5.	Нелинейная теория упругости	8	2	2		4	4
6.	Неупругое поведение деформируемого твердого тела	6	2			2	4
7.	Обзор курса	4	2			2	2
	Текущий контроль (КСР)	2				2	
	Промежуточная аттестация - экзамен	36					
	ИТОГО	144	32	32	0	66	42
¹ Самостоятельная работа обучающегося.							
² Занятия лекционного типа.							
³ Занятия семинарского типа.							
⁴ Занятия лабораторного типа.							

Краткое содержание разделов и тем дисциплины

1. **Основания МДТТ:** основные гипотезы; описание движения; деформация; законы сохранения, уравнения динамики; законы термодинамики; модели деформируемых твердых тел; постановки задач МДТТ.

2. **Линейная теория упругости:** полная система уравнений; классификация задач; основные теоремы; принцип Сен-Венана; полубратный метод Сен-Венана; вариационные принципы; постановка задач в перемещениях; формы общего решения; постановка задач в напряжениях; плоские задачи теории упругости; плоская деформация, плоское напряженное и обобщенное плоское напряженное состояние, функция напряжений Эри; постановка контактных задач; динамические задачи; волны в безграничной упругой среде; поверхностные волны Рэлея.

3. **Изотропное линейное термоупругое тело:** термоупругость; изотропная линейная термоупругая среда, физический смысл коэффициентов, входящих в модель.

4. **Нелинейная теория упругости:** геометрическая и физическая нелинейность, полная система уравнений нелинейной теории упругости.

5. **Неупругое поведение деформируемого твердого тела:** вязкоупругость; пластичность, ползучесть, релаксация; основные понятия теории пластичности; идеальная пластичность,

упрочнение; условия пластичности; поверхность пластичности; деформационные теории и теории течения; ассоциированный закон; постановки задач теории пластичности.

Содержание практических занятий

1. **Основания МДТТ:** полная система уравнений в декартовой прямоугольной системе координат и в криволинейной системе координат (цилиндрической, сферической), формулировка граничных условий (статических и кинематических).

2. **Линейная теория упругости:** задача Сен-Венана, кручение призматических стержней, изгиб балок; плоские задачи в декартовой прямоугольной системе координат, изгиб балки-стенки; плоские задачи в полярной системе координат, задача Ламе о трубе под действием внутреннего и внешнего давлений, изгиб части кругового кольца, задача Кирша об одностороннем растяжении пластины с малым круговым отверстием, действие сосредоточенной силы на вершину клина, задача Фламана о действии сосредоточенной силы на полуплоскость, элементарное решение 1-го рода, центр растяжения-сжатия, элементарное решение 2-го рода, задача Буссинеска о действии сосредоточенной силы на полупространство; контактные задачи; свободные колебания балок.

3. **Изотропное линейное термоупругое тело:**

4. **Нелинейная теория упругости:** изгиб цилиндрической панели.

5. **Неупругое поведение деформируемого твердого тела:** кручение упруго-пластических стержней; труба под давлением, предельная нагрузка; полый шар под действием внутреннего и внешнего давлений; вдавливание жесткого штампа в жесткопластическое полупространство.

Текущий контроль успеваемости реализуется в рамках занятий семинарского типа.

Промежуточная аттестация проходит в традиционных формах (зачет).

4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

В рамках дисциплины предусмотрены следующие виды самостоятельной работы (порядок их выполнения, форма контроля):

- повторение материала, пройденного на занятиях лекционного типа (в течение всего семестра, опрос на занятиях лекционного и семинарского типа),
- самостоятельное изучение отдельных вопросов программы (1 раз в семестр, опрос на занятиях семинарского типа),
- подготовка к занятиям семинарского типа, решение задач по списку, представленному преподавателем (в течение всего семестра, опрос на занятиях семинарского типа),
- подготовка к промежуточному контролю успеваемости (экзамен).

Примеры заданий для самостоятельного освоения и индивидуальной работы

1. Применение вариационных уравнений Лагранжа и Кастильяно для приближенного решения задачи кручения. Метод. разработка. Сост. Т.А. Миндлина. – Горький: Изд-во ГГУ, 1983.
2. Решение плоской задачи теории упругости с помощью функций напряжений. Методическая разработка. Сост. В.Г. Киселев, Т.А. Миндлина. – Горький: Изд-во ГГУ, 1989.
3. Упруго-пластический изгиб балок. Методическая разработка. Сост. Т.А. Миндлина. – Горький: Изд-во ГГУ, 1983.

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 *сообщений* и контрольные материалы для проведения промежуточной аттестации в форме вопросов и заданий к *зачёту*.

5.1. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине

Шкала оценивания сформированности	Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций)
-----------------------------------	--

компетенций		Знания	Умения	Навыки
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 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.
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

Оценка		Уровень подготовки
		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

№	Вопрос	Код формируемой компетенции
1.	Гипотезы классической механики сплошных сред. Описание движения материальной частицы сплошной среды: материальные и пространственные координаты, отсчетная и актуальная конфигурации, материальное (лагранжевое) и пространственное (эйлеровое) описание.	ОПК-5
2.	Деформация твердого тела. Конечные деформации. Малые перемещения. Малые деформации.	ОПК-5
3.	Меры деформации. Жесткие движения. Тензоры конечной деформации.	ОПК-5
4.	Тензор линейной деформации. Тензор малой деформации. Тензор малого поворота.	ОПК-5
5.	Геометрический смысл координат тензоров мер деформации и тензоров деформации.	ОПК-5
6.	Объемное расширение (сжатие).	ОПК-5
7.	Координаты линейного тензора деформации Коши в декартовой прямоугольной системе координат.	ОПК-2
8.	Главные оси и значения деформаций. Инварианты. Шаровой тензор и девиатор деформаций.	ОПК-2
9.	Характеристики деформаций (октаэдрическая деформация, интенсивность деформаций сдвига, интенсивность продольных деформаций, параметр Нодаи-Лоде).	ОПК-2
10.	Поверхность деформаций.	ОПК-2
11.	Определение вектора перемещений по известному тензору линейной деформации (формула Чезаро).	ОПК-2
12.	Уравнения совместности деформаций (Сен-Венана).	ОПК-2
13.	Классификация сил, действующих на сплошную среду. Взаимодействие материальных частиц сплошной среды. Гипотезы классической теории напряжений.	ОПК-5
14.	Вектор напряжения и его свойства. Фундаментальная теорема Коши (формула Коши). Обобщение закона взаимности напряжений.	ОПК-5
15.	Тензоры напряжений и их свойства. Правило знаков для компонент. Нормальное и касательное напряжение.	ОПК-2

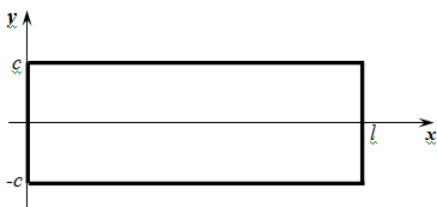
<i>№</i>	<i>Вопрос</i>	<i>Код формируемой компетенции</i>
16.	Главные оси и значения напряжений. Инварианты. Шаровой тензор и девиатор напряжений.	ОПК-2
17.	Характеристики напряжений (октаэдрическое напряжение, интенсивность напряжений сдвига, интенсивность нормальных напряжений, параметр Нодаи-Лоде).	ОПК-2
18.	Поверхность напряжений.	ОПК-2
19.	Законы сохранения и законы динамики. Уравнения движения (равновесия) сплошной среды.	ОПК-2
20.	Уравнения равновесия (движения) в декартовой прямоугольной системе координат.	ОПК-5
21.	Упругий потенциал (удельная работа деформаций или удельная потенциальная энергия деформаций).	ОПК-5
22.	Формула Грина.	ОПК-2
23.	Формула Клапейрона	ОПК-2
24.	Формула Кастилиано	ОПК-2
25.	Формула Бетти	ОПК-2
26.	Модель линейно упругого тела. Обобщенный закон Гука. Упругие постоянные при различных случаях упругой симметрии.	ОПК-2
27.	Обобщенный закон Гука для однородного изотропного линейно упругого тела.	ОПК-2
28.	Различные формы записи обобщенного закона Гука для однородного изотропного линейно упругого тела. Размерности констант.	ОПК-2
29.	Физическая и математическая постановка задачи линейной теории упругости.	ОПК-2
30.	Классификация статических задач линейной теории упругости.	ОПК-2
31.	Постановка задачи теории упругости в перемещениях (уравнения Ламе). Свойства перемещений и объемной деформации.	ОПК-2
32.	Постановка задачи теории упругости в напряжениях (уравнения Бельтрами-Мичелла). Свойства напряжений и среднего нормального давления.	ОПК-2
33.	Теорема Клапейрона (о потенциальной энергии упругого тела).	ОПК-5
34.	Теорема Бетти (о взаимности работ).	ОПК-5
35.	Теорема Кирхгофа (о единственности решения).	ОПК-5
36.	Принцип Сен-Венана. Полуобратный метод Сен-Венана.	ОПК-5
37.	Формы решений уравнений упругого равновесия (Стокса, Кельвина, Буссинеска-Папковича-Галеркина).	ОПК-2
38.	Вариационный принцип Лагранжа (принцип минимума потенциальной энергии).	ОПК-2
39.	Вариационный принцип Кастилиано (принцип минимума дополнительной работы).	ОПК-2
40.	Вариационные принципы Рейснера, Ху-Вашицу.	ОПК-2
41.	Задача кручения призматических стержней. Функция напряжений Прандтля. Теорема Бредта. Теорема о максимуме касательного напряжения.	ОПК-2
42.	Плоская задача теории упругости в декартовой прямоугольной системе координат (плоское деформированное состояние, плоское напряженное состояние, обобщенное плоское напряженное состояние). Функция напряжений Эри. Теорема Леви.	ОПК-2
43.	Решение плоской задачи теории упругости с помощью степенных рядов	ОПК-2

№	Вопрос	Код формируемой компетенции
	(изгиб балки-стенки).	
44.	Решение плоской задачи теории упругости с помощью тригонометрических рядов.	ОПК-2
45.	Плоская задача теории упругости в полярных координатах.	ОПК-2
46.	Задача Ламе (труба под давлением).	ОПК-2
47.	Изгиб части кругового кольца.	ОПК-2
48.	Задача Кирша (одноосное растяжение пластины с малым круговым отверстием).	ОПК-2
49.	Действие сосредоточенной силы на вершину бесконечного треугольного клина.	ОПК-2
50.	Задача Фламана (действие сосредоточенной силы на полуплоскость).	ОПК-2
51.	Задача о контакте двух тел (геометрические соотношения).	ОПК-2
52.	Элементарное решение первого рода.	ОПК-2
53.	Центр растяжения (сжатия) в бесконечном теле.	ОПК-2
54.	Элементарное решение второго рода.	ОПК-2
55.	Постановка и решение задачи о контакте двух тел.	ОПК-2
56.	Основы теории пластичности	ОПК-2

5.2.2. Типовые задания/задачи для оценки сформированности компетенции ОПК-2

1. Вектор напряжения и его свойства. Фундаментальная теорема Коши (формула Коши).
2. Математическая постановка задачи динамики линейно упругого однородного деформируемого твердого тела.
3. Известно, что функция напряжений

$$\Phi(x, y) = \frac{3a}{4c} \left(xy - \frac{xy^3}{3c^2} \right) + \frac{b}{2} y^2, \quad (a = \text{const}, b = \text{const})$$



дает решение задачи о плоском напряженном состоянии длинной прямоугольной полосы ($c \ll L$). Найти напряжения на сторонах $y = \pm c$, изгибающий момент и поперечную силу на краях $x = 0, x = L$.

6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

№	а) основная литература:	К-во ¹
1.	Седов Л. И. Механика сплошной среды. СПб.: Лань, 2004. Т. 1. 528 с. Т. 2. 560 с. (http://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/books/Sedov_MSS_t1_1970ru.djvu , http://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/books/Sedov_MSS_t2_1970ru.djvu).	Э
2.	Ильюшин А.А. Механика сплошной среды. Учебник- 3-е изд. – М.: Изд-во МГУ, 1990.- 310 с. (http://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/books/Ilyushin1971ru.djvu).	Э
3.	Демидов С.П. Теория упругости. Учебник для вузов-М.: Высш. школа, 1979-432с. (http://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/books/Demidov1979ru.djvu).	Э
4.	Лурье А.И. Нелинейная теория упругости – М.: Наука, 1980. 512 с. (http://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/books/Lure1980ru.djvu).	Э
5.	Амензаде Ю. А. Теория упругости. М.: Высшая школа, 1976. 272 с.	Э

¹ Указывается количество экземпляров в библиотеке ННГУ. Если издание доступно в электронном виде (указана ссылка), указывается буква «Э».

№	а) основная литература:	К-во ¹
	(http://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/books/Amenzade1976ru.djvu).	
6.	Качанов Л. М. Основы теории пластичности. М.: Наука, 1969. 420 с. (http://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/books/Kachanov1969ru.djvu).	Э
7.	Мейз Дж. Теория и задачи механики сплошных сред. Пер. с англ. под ред. М. Э. Эглит. М.: Мир, 1974. 320 с. (http://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/books/Mase1974ru.djvu).	Э

№	б) дополнительная литература:	К-во ¹
1.	Прагер В. Введение в механику сплошных сред. Пер. с нем. под ред. Л. П. Смирнова и Г. С. Шапиро. М.: ИЛ, 1963. 312 с. (http://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/books/Prager1963ru.djvu).	Э
2.	Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. Пер. с англ.-2-е изд. – М.: Наука, 1979. 560 с. (http://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/books/TimoshenkoGuder1975ru.djvu).	Э
3.	Уравнения и краевые задачи теории пластичности и ползучести. Справочное пособие / Писаренко Г.С., Мажоровский Н.С. Киев, Наукова думка – 1981. – 496 с. (http://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/books/PisarenkoMazharovskij1981ru.djvu).	Э
4.	Галин Г. Я., Голубятников А. Н., Каменярж Я. А. и др. Механика сплошных сред в задачах. Под ред. М. Э. Эглит. М.: Московский лицей, 1996. Т. 1. Теория и задачи. 369 с. (http://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/books/Eglit_MSSzadach_t1_1996ru.djvu). Т. 2. Ответы и решения. 394 с. (http://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/books/Eglit_MSSzadach_t2_1996ru.djvu).	Э

№	в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы (в соответствии с содержанием дисциплины)	«Л» или «С» ²
1.	ANSYS	Л
2.	http://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/mechanics.htm	С

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Помещения представляют собой учебные аудитории для проведения учебных занятий лекционного и семинарского типа, оснащенные оборудованием и техническими средствами обучения: мультимедийная техника (компьютер, проектор, экран).

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 ФГОС ВО 01.03.03 Механика и математическое моделирование

Программа одобрена на заседании методической комиссии института информационных технологий, математики и механики
от 24.02.2021 года, протокол № 5.

Автор(ы)

к.т.н., доцент
Жидков А.В.

Рецензент(ы)

Заведующий кафедрой
теоретической, компьютерной и
экспериментальной механики

д.ф.-м.н., профессор
Игумнов Л.А.

² Указывается буква «Л», если программное обеспечение – лицензионное, или «С» – в свободном доступе.