

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 Ученого совета ННГУ

протокол № 10 от 02.12.2024 г.

Рабочая программа дисциплины

Теплопроводность и термоупругость

Уровень высшего образования

Специалитет

Направление подготовки / специальность

01.05.01 - Фундаментальные математика и механика

Направленность образовательной программы

Фундаментальная механика и приложения

Форма обучения

очная

г. Нижний Новгород

2025 год начала подготовки

1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.В.03 Теплопроводность и термоупругость относится к части, формируемой участниками образовательных отношений 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
ПК-6: Владение навыками самостоятельного анализа поставленной задачи, выбора корректного метода ее решения, построения алгоритма и его реализации	ПК-6.1: Умеет самостоятельно анализировать задачу, выбирать методы решения, создавать алгоритм решения и реализовывать его ПК-6.2: Владеет навыками решения практических задач, анализа результатов решения	ПК-6.1: Умения самостоятельно анализировать задачу, выбирать методы решения, создавать алгоритм решения и реализовывать его для анализа конструкций при воздействии температурных полей ПК-6.2: Владения навыками решения практических задач, анализа результатов решения поведения конструкций при воздействии температурных полей	Расчетно-графическая работа Собеседование	Экзамен: Задания Контрольные вопросы

3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Трудоемкость дисциплины

	очная
Общая трудоемкость, з.е.	3
Часов по учебному плану	108
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	
- занятия лекционного типа	16
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	16
- КСР	2
самостоятельная работа	38
Промежуточная аттестация	36

3.2. Содержание дисциплины

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

Наименование разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	в том числе			
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них			Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа (практические занятия/лабораторные работы), часы	Всего	
	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0
1. Введение. Постановка задачи термоупругости	8	2	2	4	4
2. Плоские задачи термоупругости	8	2	2	4	4
3. Энергетические теоремы и соотношения в термоупругости	8	2	2	4	4
4. Температурные напряжения в стержневых конструкциях	8	2	2	4	4
5. Постановка задачи теплопроводности	8	2	2	4	4
6. Исследование задач теплопроводности и температурных полей.	8	2	2	4	4
7. Нестационарная теплопроводность.	8	2	2	4	4
8. Вариационная постановка задачи теплопроводности. Метод конечных элементов для задач теплопроводности и термоупругости	14	2	2	4	10
Аттестация	36				
КСР	2			2	
Итого	108	16	16	34	38

Содержание разделов и тем дисциплины

1. Введение. Постановка задачи термоупругости
2. Плоские задачи термоупругости
3. Энергетические теоремы и соотношения в термоупругости
4. Температурные напряжения в стержневых конструкциях
5. Постановка задачи теплопроводности
6. Исследование задач теплопроводности и температурных полей.
7. Нестационарная теплопроводность.
8. Вариационная постановка задачи теплопроводности. Метод конечных элементов для задач теплопроводности и термоупругости

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.

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).

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 ПК-6:

Статически определяемая рама состоит из трех звеньев длиной L_1 , L_2 и L_3 . Рама жестко закреплена в одном из узлов (1 или 4). Материал стержней характеризуется величинами E , α . Сечение имеет прямоугольную форму. Геометрические характеристики сечения A , J , H (Площадь, момент инерции и высота профиля). В узловых точках заданы температуры внутреннего и наружного контура и , где k обозначает номер точки (от 1 до 4), i — точка внутреннего, o — точка наружного контура. Распределение температуры по высоте и длине стержня считается линейным.

Задания для оценки компетенций.

Определить среднюю по сечению температуру и наклон в сечениях, соответствующих узловым точкам.

Определить температурные силы и моменты.

С помощью интегралов Мора и правила Верещагина определить температурные перемещения точек 1-4.

Определить значения внутренних усилий (нормальных и перерезывающих), моментов и напряжений.

Критерии оценивания (оценочное средство - Расчетно-графическая работа)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Ответ полный и правильный на основании изученной теории; теоретический материал и решение поставленных задач изложены в необходимой логической последовательности, грамотный научный язык; ответ самостоятельный. Могут быть допущены две-три не существенные ошибки, исправленные по требованию преподавателя
не зачтено	Ответ обнаруживает непонимание студентом основного содержания учебного материала или допущены существенные ошибки, которые не могут быть исправлены при наводящих вопросах преподавателя

5.1.2 Типовые задания (оценочное средство - Собеседование) для оценки сформированности компетенции ПК-6:

1. Примеры научных и технических приложений, в которых возникают задачи ТyТп
2. Основные предположения тy.

3. Температурные деформации
4. Представление полных деформаций
5. Соотношения Дюамеля-Неймана.
6. Постановка задачи термоупругости.
7. Причины возникновения температурных напряжений.
8. Причины возникновения температурных напряжений в терминах уравнений т.у.
9. При каких распределениях температуры температурные деформации удовлетворяют уравнениям Сен-Венана
10. Аналогия С.П. Тимошенко.

Критерии оценивания (оценочное средство - Собеседование)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Ответ полный и правильный на основании изученной теории; теоретический материал и решение поставленных задач изложены в необходимой логической последовательности, грамотный научный язык; ответ самостоятельный. Могут быть допущены две-три незначительные ошибки, исправленные по требованию преподавателя
не зачтено	Ответ обнаруживает непонимание студентом основного содержания учебного материала или допущены существенные ошибки, которые не могут быть исправлены при наводящих вопросах преподавателя

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

Шкала оценивания сформированности компетенций

Уровень сформированности компетенций (индикатор достижения компетенций)	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
	не зачтено		зачтено				
<u>Знания</u>	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено незначительных	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Ошибок нет.	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.

					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	Продемонстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с отдельным и несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов
<u>Навыки</u>	Отсутствие базовых навыков. Невозможность оценить наличие навыков 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	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов	Продемонстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов	Продемонстрирован 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 - Задания) для оценки сформированности компетенции ПК-6

1. Задана двухслойная стенка, левый слой имеет коэффициент теплопроводности $k_1=0.01$, правый - $k_2=100$. Температура левой внешней границы 0°C , правой внешней границы 100°C . Определить распределение температуры в стенке.
2. Задана двухслойная стенка, левый слой имеет коэффициент теплопроводности $k_1=100$, правый - $k_2=0.01$. Температура левой внешней границы 0°C , правой внешней границы 100°C . Определить распределение температуры в стенке.
3. Определить поток тепла, снимаемый с ребра длиной 10 см, сечением $2 \times 1,5$ см, температура основания ребра 225°C , температура окружающей среды 0°C , коэффициент теплопроводности ребра $k=400$ Вт/(м*град), коэффициент теплообмена $h_c=1,75$ Вт/(м²*град). Указание: коэффициент теплопроводности можно считать бесконечно большим.
4. Определить распределение температуры в прямоугольной стенке толщиной $h=10$ см, если на левой стороне задана температура 100°C , а на правой – тепловой поток 10 Вт/м², направленный во внутрь стенки. Найти температуру правой стороны стенки, если коэффициент теплопроводности $k=0,05$ Вт/(м*град).
5. Рассчитать плотность теплового потока через плоскую кирпичную стенку ($k=0,65$ Вт/(м*град)) толщиной 15 см, если температура наружной поверхности 35°C , а температура внутренней поверхности 25°C . Вычислить термическое сопротивление на единицу площади поверхности стенки. Найти температуру в среднем сечении.
6. Плотность теплового потока (в направлении оси X) через алюминиевую ($k=200$ Вт/(м*град)) пластину толщиной 10 см равна 50000 Вт/м². Температура левой стороны пластины равна 150°C . Найти температуру правой поверхности пластины.
7. Плотность теплового потока (в направлении оси X) через пластину из нержавеющей стали ($k=50$ Вт/(м*град)) толщиной 10 см равна 50000 Вт/м². Температура правой стороны пластины равна 150°C . Найти температуру левой поверхности пластины.)
8. Лист оконного стекла имеет толщину 4 мм и площадь поверхности 2 м². Найти плотность теплового потока и полный поток через стекло, если температура внешней поверхности 0°C , внутренней поверхности 20°C . Коэффициент теплопроводности принять равным $0,6$ Вт/(м*град)).
9. Температура левой стороны стенки толщиной 10 см равна 50°C , на правой стороне задан тепловой поток плотностью 100 Вт/м², направленный внутрь стенки. Найти температуру на правой стороне стенки, если коэффициент теплопроводности материала равен $0,2$ Вт/(м*град)).
10. Стенка большой печи толщиной 1,5 см изготовлена из чугуна ($k=50$ Вт/(м*град)). Температура горячего газа 1100°C , коэффициент конвективной теплоотдачи на внутренней поверхности стенки 250 Вт/(м²*град). Наружная поверхность печи окружена воздухом с температурой 30°C . Коэффициент конвективной теплоотдачи на наружной поверхности стенки 20 Вт/(м²*град). Найти плотность теплового потока через стенку печи, температуры внутренней и наружной поверхностей стенки.
11. Плоская стенка толщиной 1 м имеет коэффициент теплопроводности 10 Вт/(м²*град). Интенсивность внутреннего тепловыделения в единице объема стенки изменяется по закону $100 \cdot x \cdot x$ Вт/м³. Температура обеих поверхностей стенки 0°C . Определить температуру в средней точке стенки, тепловой поток на сторонах и в средней точке стенки.
12. Кубик алюминия (плотность 2700 кг/м³, теплоемкость 900 Дж/(кг*град), теплопроводность 230 Вт/(м*град)) со стороной 1 см нагревают в открытом пламени с 50°C до 300°C . Сколько времени

нужно держать кубик в пламени, если температура пламени 800 °С, а коэффициент конвективной теплоотдачи от пламени к алюминию 190 Вт/(м²*град).

13. Свободное тело в форме шара с центром в начале координат нагрето на температуру 100°С. Коэффициент теплового расширения 0,01/°С. Определить поле температурных перемещений.
14. Тело в форме куба. Одна из вершин имеет координаты (0, 0, 0), расположенная по диагонали куба - (10, 10, 10). Размеры в сантиметрах. Найти изменение объема тела, если задано поле температур $T = T_0(10+3x-2y+4z)$. $E=2 \cdot 10^{11}$ Па, $\alpha=1,67 \cdot 10^{-6}$. Выражение в скобках имеет размерность см, величина T_0 равна 1,45°С/см.
15. Тело в форме куба. Одна из вершин имеет координаты (0, 0, 0), расположенная по диагонали куба - (10, 10, 10). Размеры в сантиметрах. Найти изменение объема тела, если задано поле температур $T = T_0(10+x+3y+z)$. $E=2 \cdot 10^{11}$ Па, $\alpha=1,25 \cdot 10^{-6}$. Выражение в скобках имеет размерность см, величина T_0 равна 1,55°С/см.
16. Определить изменение длины стального стержня: стержень длиной 10 см. Стержень нагрет на температуру, задаваемую законом $T = T_0(10+x+2y+4z)$. Начало координат связано с левым концом стержня. Правый конец лежит на оси x. $E=2 \cdot 10^{11}$ Па, $\alpha=1,85 \cdot 10^{-6}$. Выражение в скобках имеет размерность см, величина T_0 равна 25,75°С/см.
17. Определить максимальное по абсолютной величине напряжение в свободной балке, если температура по высоте изменяется по квадратичному закону $T=((z/h)**2-1)$. Высота балки 2h. $E=2 \cdot 10^{11}$ Па, $\alpha=1 \cdot 10^{-6}$, $h=0.012$ мм.
18. Определить максимальное по абсолютной величине напряжение в свободной балке, если температура по высоте изменяется по квадратичному закону $T=((z/h)+1)**2$. Высота балки 2h. $E=2 \cdot 10^{11}$ Па, $\alpha=1 \cdot 10^{-6}$, $h=0.012$ мм.
19. Задан эллипсоид с полуосями 1, 2, и 3 мм. Модуль упругости $E=2 \cdot 10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона $\nu=0.3$, коэффициент теплового расширения $1 \cdot 10^{-6}$. Температура постоянна и равна 200°С. Точки границы жестко закреплены. Определить напряжения в материале.
20. Стержень длиной 10 см с площадью сечения 2 см² нагрет на температуру, задаваемую формулой $T = T_0(1+x/L)$. Распределение температуры по сечению однородно. Определить удлинение стержня, если механические характеристики материала стержня $E=2 \cdot 10^{11}$ Па, $\nu=0.3$, $\alpha=1 \cdot 10^{-6}$. $T_0=196$ °С.

Критерии оценивания (оценочное средство - Задания)

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 ошибки
плохо	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить

Оценка	Критерии оценивания
	полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа

5.3.2 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ПК-6

Основные предположения. Соотношения Дюамеля-Неймана. Постановка задачи термоупругости. Причины возникновения температурных напряжений. Разделение напряжений, обусловленных температурой и внешними нагрузками и связями. Формулировка в перемещениях, аналогия С.П. Тимошенко. Постановка в напряжениях. 3d задачи, в которых напряжения равны нулю. 3d задачи, в которых перемещения равны нулю.

Плоские задачи термоупругости. Плоская деформация, условия на распределение температуры при плоской деформации. О граничных условиях на торцах. Формулировка в перемещениях. Формулировка в напряжениях, функция Эри. Плоское напряженное состояние. 2d задачи, в которых напряжения в плоскости равны нулю. Длинная прямоугольная пластина (балка) с изменением температуры только по высоте, различные случаи распределения температуры (линейный, квадратичный, кубический). Задача о деформировании кольца (цилиндра) при радиальном распределении температуры.

Энергетические теоремы в термоупругости. Энергия деформации и дополнительная энергия. Основное энергетическое тождество. Вариационное уравнение Кастильяно и принцип стационарности дополнительной энергии. Начало дополнительной работы. Вариационное уравнение Лагранжа и принцип стационарности полной потенциальной энергии. Теорема взаимности в термоупругости и ее применение: изменение объема тела, изменение объема полости, удлинение, взаимный поворот концевых сечений, прогиб консоли, взаимное закручивание концевых сечений.

Температурные напряжения в свободных и несвободных балках. Расчет статически определимых структур, определение перемещений с помощью интеграла Мора. Расчет статически неопределимых структур. Модификация методов сил и перемещений для случая термоупругости.

Способы теплообмена: теплопроводность, конвекция, излучение. Закон Фурье, уравнение теплопроводности Фурье, начальные и граничные условия, размерность и безразмерный вид, числа Био и Фурье.

Исследование температурных полей. Распределение температуры в прямоугольной стенке в декартовой системе координат, аналогия с законом Ома, распределение температуры в двухслойной (многослойной) стенке. Теплообмен в трубах. Температура в стенке при наличии тепловыделения.

Теплообмен в ребрах, различные условия на торце, коэффициент интенсивности ребра.

Нестационарные задачи теплообмена. Системы с пренебрежимо малым внутренним тепловым сопротивлением. Температурные поля в полубесконечном теле при различных граничных условиях.

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 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. Боли Бруно А. Теория температурных напряжений / пер. с англ. Ж. С. Сисляна и Б. Ф. Шорра ; под ред. Э. И. Григолюка. - М. : Мир, 1964. - 517 с. : черт. - 2.83., 2 экз.
2. Тимошенко Степан Прокофьевич. Теория упругости / пер. с англ. М. И. Рейтмана ; под ред. Г. С. Шапиро. - 2-е изд. - М. : Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1979. - 560 с. : ил. - 2.70., 2 экз.
3. Сегерлинд Ларри Дж. Применение метода конечных элементов / пер. с англ. А. А. Шестакова ; под ред. Б. Е. Победри. - М. : Мир, 1979. - 392 с. : ил. - 1.80., 2 экз.
4. Крейт Фрэнк. Основы теплопередачи : пер. с англ. / под ред. Н. А. Анфимова. - М. : Мир, 1983. - 512 с. : ил. - 3.70., 1 экз.

Дополнительная литература:

1. Новацкий Витольд. Динамические задачи термоупругости / пер. с пол. Я. Рыхлевского ; под ред. Г. С. Шапиро. - М. : Мир, 1970. - 256 с. : черт. - 1.40., 3 экз.

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

<http://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/mathematics/difgeometry.htm>

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных образовательной программой, оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран), техническими средствами обучения, компьютерами, специализированным оборудованием: 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 ОС ННГУ по направлению подготовки/специальности 01.05.01 - Фундаментальные математика и механика.

Автор(ы): Жидков Александр Васильевич, кандидат технических наук, доцент.

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

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 02.12.2024, протокол № 5.