

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 № 12 от 26.12.2023 г.

Рабочая программа дисциплины

Численные методы в механике деформируемого твердого тела

Уровень высшего образования
Бакалавриат

Направление подготовки / специальность
15.03.03 - Прикладная механика

Направленность образовательной программы
Инженерное приложение суперкомпьютерного моделирования

Форма обучения
очная

г. Нижний Новгород

2024 год начала подготовки

1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.В.07 Численные методы в механике деформируемого твердого тела 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-2: Умеет извлекать актуальную научно-техническую информацию из электронных библиотек, научных сайтов и т.д., анализировать полученную информацию для применения в научной работе, а также публично представлять полученные результаты с учетом уровня аудитории | ПК-2.1: Умеет извлекать актуальную научно-техническую информацию из электронных библиотек, научных сайтов и т.д. ПК-2.2: Знает методы анализа полученной информации, умеет применять ее в научной работе ПК-2.3: Имеет практический опыт публичного представления полученных результатов в соответствии с уровнем аудитории | ПК-2.1: Умеет извлекать актуальную научно-техническую информацию из электронных библиотек, научных сайтов и т.д. ПК-2.2: Знает методы анализа полученной информации, умеет применять ее в научной работе ПК-2.3: Владеет навыками публичного представления полученных результатов в соответствии с уровнем аудитории | Практическое задание | Экзамен: Контрольные вопросы Практическое задание |
| ПК-3: Умеет определять круг задач в рамках поставленной цели, использовать физические и компьютерные модели объектов и явлений реального мира и современное экспериментальное оборудование, применять математически сложные алгоритмы в современных специализированных | ПК-3.1: Знает методологию определения круга задач в рамках поставленной цели. ПК-3.2: . Умеет использовать физические и компьютерные модели объектов и явлений реального мира и современное экспериментальное оборудование. ПК-3.3: Имеет практический опыт применения математически сложных алгоритмов в современных | ПК-3.1: Знает методологию определения круга задач в рамках поставленной цели. ПК-3.2: Умеет использовать физические и компьютерные модели объектов и явлений реального мира и современное экспериментальное оборудование ПК-3.3: Владеет навыками | Практическое задание | Экзамен: Контрольные вопросы Практическое задание |

| | | | | |
|------------------------|---|---|--|--|
| программных комплексах | специализированных программных комплексах | применения математически сложных алгоритмов в современных специализированных программных комплексах | | |
|------------------------|---|---|--|--|

3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Трудоемкость дисциплины

| | |
|--|-----------------------------|
| | очная |
| Общая трудоемкость, з.е. | 5 |
| Часов по учебному плану | 180 |
| в том числе | |
| аудиторные занятия (контактная работа): | |
| - занятия лекционного типа | 32 |
| - занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы) | 32 |
| - КСР | 2 |
| самостоятельная работа | 78 |
| Промежуточная аттестация | 36 экзамен |

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 | |
| | о ф о | о ф о | о ф о | о ф о | о ф о |
| 1. Введение | 8 | 2 | 0 | 2 | 6 |
| 2. Постановки задач | 23 | 4 | 4 | 8 | 15 |
| 3. Методы численного решения | 25 | 4 | 6 | 10 | 15 |
| 4. Возможности системы ANSYS | 21 | 4 | 6 | 10 | 11 |
| 5. Метод конечных элементов | 31 | 8 | 8 | 16 | 15 |
| 6. Решение плоских и трёхмерных задач | 32 | 8 | 8 | 16 | 16 |
| 7. Обзор курса | 2 | 2 | 0 | 2 | 0 |
| Аттестация | 36 | | | | |
| КСР | 2 | | | 2 | |

| | | | | | |
|-------|-----|----|----|----|----|
| Итого | 180 | 32 | 32 | 66 | 78 |
|-------|-----|----|----|----|----|

Содержание разделов и тем дисциплины

1. Введение. Математическое и компьютерное моделирование. Вычислительный эксперимент.
2. Постановки задач. Задачи статики и динамики. Дифференциальные постановки задач. Вариационные постановки задач. Одномерные, двумерные, трёхмерные задачи.
3. Методы численного решения. Разностные методы. Вариационные методы. Аппроксимация, устойчивость, сходимость. Явные, неявные схемы.
4. Возможности системы Логос. Препроцессор, процессор, постпроцессор.
5. Метод конечных элементов. Идея, семейства, криволинейные, численное интегрирование, точность и сходимость.
6. Решение плоских и трёхмерных задач. Плоская деформация, плоское напряжённое состояние, осесимметричные задачи. Изгиб пластин. Исследование сходимости. Исследование концентраторов.
7. Обзор курса. Подготовка к промежуточной аттестации.

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 решение задач (3 задачи в семестр, опрос на занятиях семинарского типа),
- подготовка к занятиям семинарского типа (в течение всего семестра, опрос на занятиях семинарского типа),
- подготовка к промежуточной аттестации.

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 - Практическое задание) для оценки сформированности компетенции ПК-2:

Практическое задание №1. Исследование сходимости решения МКЭ на примере расчета балки-стенки. Треугольный конечный элемент.

1. Построить, пользуясь методами сопротивления материалов, «точное» решение для прогиба балки при заданной нагрузке;
2. Построить геометрическую и конечно-элементную модель балки-стенки, используя для дискретизации плоский треугольный конечный элемент с тремя узлами. Построение модель реализовать

в виде командного файла, в котором предусмотреть введение параметров, задающих размеры и густоту сетки, что позволит быстро настраивать модель на разные варианты расчета;

3. Пользуясь построенным командным файлом, решить задачу при значениях N - число элементов по толщине балки-стенки - от 2 до 10 и построить график сходимости решения в зависимости от этого параметра;

4. Изменить соотношение размеров вертикальной и горизонтальной сторон конечного элемента, скорректировать командный файл и построить графики сходимости. Рассмотреть кроме исходного (равного 1) соотношения длины горизонтальной стороны к вертикальной, равное 1.5, 2, 2.5 и 3. Для построения графиков использовать MS Excel.

Практическое задание №2. Исследование сходимости решения МКЭ на примере расчета балки-стенки. Четырехугольный конечный элемент

1. Изучить, используя Справочную систему Логос и указанную литературу, теоретические основы построения конечного элемента PLANE182 при значениях $keyopt(1)=0, 1, 3$.

2. Построить геометрическую и конечно-элементную модель балки-стенки, используя для дискретизации плоский прямоугольный четырехузловой конечный элемент. Построение модели реализовать в виде командного файла, в котором предусмотреть введение параметров, задающих размеры и густоту сетки;

3. На примере консольной балки с соотношением сторон 1:10 построить для четырех-угольного элемента PLANE182 графики сходимости численного решения к точному при значениях $keyopt(1)=0, 1, 3$.

4. Значения N изменять от 1 до 6.

5. Рассмотреть соотношения длины горизонтальной стороны элемента к вертикальной, равные 1, 1.5, 2, 2.5 и 3. Для построения графиков использовать MS Excel.

6. Для $keyopt(1)=0, 1, 3$ рассмотреть задачу:

Соотношение сторон 1: 100, ОДИН конечный элемент, сравнить прогиб свободного конца с точным значением прогиба.

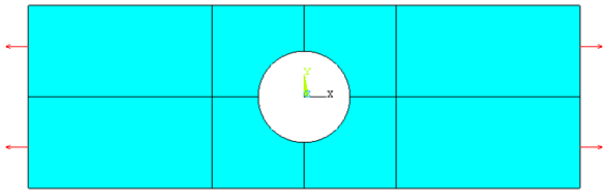
5.1.2 Типовые задания (оценочное средство - Практическое задание) для оценки сформированности компетенции ПК-3:

Практическое задание №1. Исследование концентрации напряжений в плоских образцах

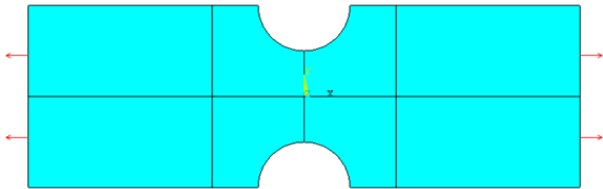
Постановка задачи

Задан образец с концентратором напряжений в виде эллипса с полуосями a (горизонтальная) и b (вертикальная). Образец может быть трех типов.

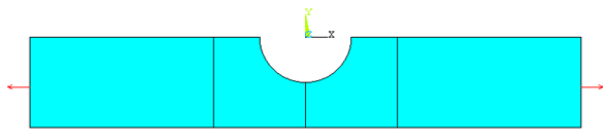
А) Пластина с отверстием



Б) Пластина с симметричными выкружками



В) Пластина с несимметричной выкружкой

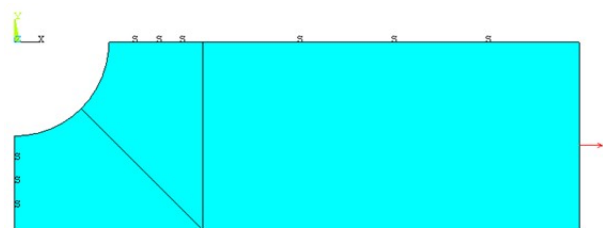


Расчетная схема.

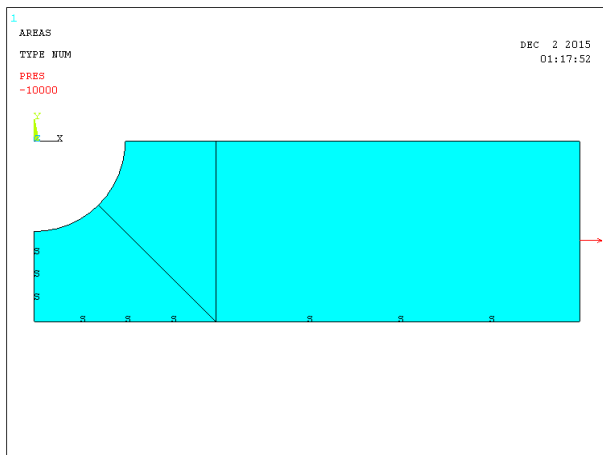
Для построения расчетной схемы указанных задач может быть использована одна и та же расчетная область, но с различными граничными условиями.

А) Пластина с отверстием

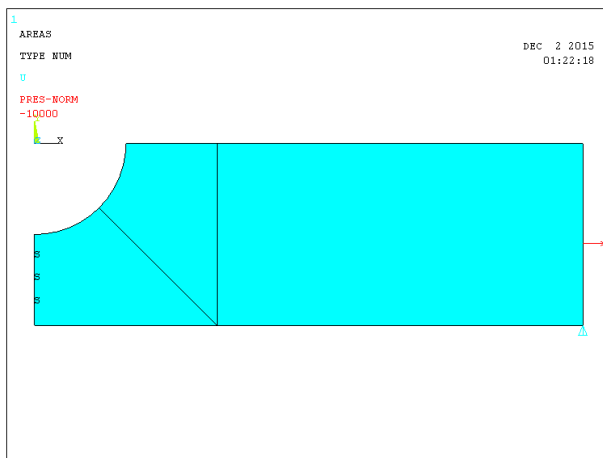
Символ «S» обозначает симметричные граничные условия.



Б) Пластина с симметричной выкружкой



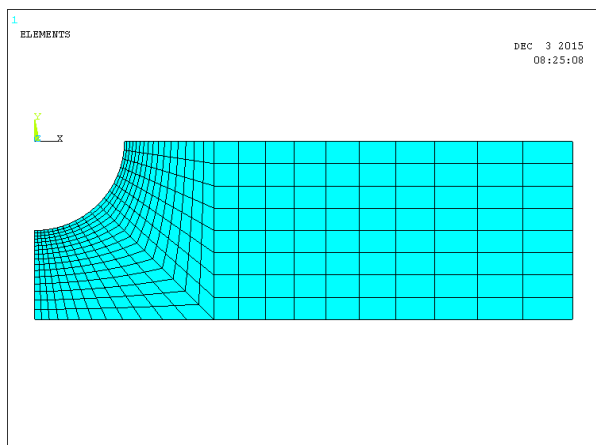
В) Пластина с несимметричной выкружкой



Сетка.

Вариант *блочно-регулярной* сетки. Это означает, что расчетную область нужно разбить на блоки, в каждом из которых возможно построить регулярную (mapped) сетку. Для этого блок должен иметь три или четыре стороны. Если реальное число сторон блока другое, рекомендуется применить операцию конкатенации (MainMenu\Preprocessor\Meshing\Concatenate\Lines) или разбить блок на подходящие части.

Для успешного решения задачи следует сгустить сетку к предполагаемому месту концентрации напряжений. Для этого следует использовать неравномерную разбивку линий.



Горизонтальный размер прямоугольного блока может варьироваться. Его желательно подобрать таким, чтобы напряжения и перемещения на правом конце образца были бы однородными (постоянными).

Вариант *нерегулярной* сетки (тип *free*).

| № варианта | Тип образца | Полуширина образца* | Полуось a (горизонтальная) | Полуось b (вертикальная) |
|------------|-------------|---------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| 1 | А | 25 | 10 | 10 |
| 2 | Б | 25 | 10 | 10 |
| 3 | В | 25 | 10 | 10 |
| 4 | А | 25 | 7.5 | 10 |
| 5 | Б | 25 | 7.5 | 10 |
| 6 | В | 25 | 7.5 | 10 |
| 7 | А | 25 | 5 | 10 |
| 8 | Б | 25 | 5 | 10 |
| 9 | В | 25 | 5 | 10 |
| 10 | А | 25 | 12.5 | 12.5 |
| 11 | Б | 25 | 12.5 | 12.5 |
| 12 | В | 25 | 12.5 | 12.5 |
| 13 | А | 25 | 10 | 12.5 |
| 14 | Б | 25 | 10 | 12.5 |

| | | | | |
|----|---|----|-----|------|
| | | | | |
| 15 | В | 25 | 10 | 12.5 |
| 16 | А | 25 | 7.5 | 12.5 |
| 17 | Б | 25 | 7.5 | 12.5 |
| 18 | В | 25 | 7.5 | 12.5 |
| 19 | А | 25 | 5 | 12.5 |
| 20 | Б | 25 | 5 | 12.5 |
| 21 | В | 25 | 5 | 12.5 |

* Для образца типа В - ширина

Размеры заданы в мм. Задачу решать в системе единиц СИ. Давление на свободном конце образца приложить 10 МПа.

Задание.

1. Построить КЭ модель задачи. Рекомендуется для построения модели использовать графический интерфейс, а затем, на этой основе создать командный файл, содержащий основные параметры настройки модели.
2. Решить задачу.
3. Подобрать сетку из условия сходимости решения. Построить график сходимости.
4. Сравнить решение с известными в литературе аналитическими оценками концентрации напряжений.
5. Составить отчет о проделанной работе.

Критерии оценивания (оценочное средство - Практическое задание)

| 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 (индикатора 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 несколько несущественных ошибок | Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Ошибок нет. | Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки. |
| <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 и 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 ПК-2

1. Дифференциальная и вариационная постановки задачи теории упругости.
2. Решение 2d задачи с помощью треугольного элемента с линейными функциями формы.
3. Решение 2d задачи с помощью четырехугольного элемента с билинейными функциями формы.
4. Вектор эквивалентных узловых сил от распределенной объемной и поверхностной нагрузок.
5. Анализ аппроксимаций перемещений. Ложный сдвиг. Моментная схема конечных элементов.
6. Прямоугольные КЭ. Сирендипово семейство функций формы
7. Прямоугольные КЭ. Лагранжево семейство функций формы.
8. Семейство треугольных элементов. Построение узлов и аппроксимаций для элемента произвольного порядка. Свойства построенных функций формы.
9. Дифференцирование и интегрирование функций формы треугольных КЭ и их производных.
10. Аппроксимация геометрии. Криволинейные КЭ. Пределы искажения формы и положения узлов криволинейного КЭ
11. Технология построения матрицы жесткости изопараметрических КЭ.
12. Численное интегрирование. Квадратурные формулы Гаусса. Выбор необходимой точности интегрирования.

13. Полное, сокращенное, выборочное интегрирование
14. Точность и сходимость метода конечных элементов. Понятие и определение точности, сходимости и устойчивости численного метода.
15. Анализ ошибок вычислений. Число обусловленности матриц СЛАУ. Зависимость числа обусловленности от различных факторов.
16. Ошибки аппроксимации. Совместные элементы. Критерий полноты.
17. Несовместные элементы. Кусочный тест Айронса.

5.3.2 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ПК-3

1. Дифференциальная и вариационная постановки задачи теории упругости.
2. Решение с помощью треугольного элемента с линейными функциями формы.
3. Решение с помощью четырехугольного элемента с билинейными функциями формы.
4. Вектор эквивалентных узловых сил от распределенной объемной и поверхностной нагрузок.
5. Анализ аппроксимаций перемещений. Ложный сдвиг. Моментная схема конечных элементов.
6. Прямоугольные КЭ. Сирендипово семейство функций формы
7. Прямоугольные КЭ. Лагранжево семейство функций формы.
8. Семейство треугольных элементов. Построение узлов и аппроксимаций для элемента произвольного порядка. Свойства построенных функций формы.
9. Дифференцирование и интегрирование функций формы треугольных КЭ и их производных.
10. Аппроксимация геометрии. Криволинейные КЭ. Пределы искажения формы и положения узлов криволинейного КЭ
11. Технология построения матрицы жесткости изопараметрических КЭ.
12. Численное интегрирование. Квадратурные формулы Гаусса. Выбор необходимой точности интегрирования.
13. Полное, сокращенное, выборочное интегрирование
14. Точность и сходимость метода конечных элементов. Понятие и определение точности, сходимости и устойчивости численного метода.
15. Анализ ошибок вычислений. Число обусловленности матриц СЛАУ. Зависимость числа обусловленности от различных факторов.
16. Ошибки аппроксимации. Совместные элементы. Критерий полноты.
17. Несовместные элементы. Кусочный тест Айронса.

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. |

| Оценка | Критерии оценивания |
|---------------------|---|
| | Допущено несколько негрубых ошибок |
| удовлетворительно | Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибки. |
| неудовлетворительно | Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки. |
| плохо | Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа |

5.3.3 Типовые задания (оценочное средство - Практическое задание) для оценки сформированности компетенции ПК-2

1. Характеризовать основные возможности программного комплекса Логос
2. Характеризовать методы решения систем линейных уравнений в программном комплексе Ло-гос
3. Численное интегрирование. Квadrатурные формулы Гаусса. Выбор необходимой точности интегрирования.
4. Аппроксимация геометрии. Криволинейные КЭ. Пределы искажения формы и положения узлов криволинейного КЭ
5. Технология построения матрицы жесткости изопараметрических КЭ.
6. Записать постановку краевой задачи для плоского напряженного состояния (плоской деформации) в перемещениях.
7. Записать принцип Лагранжа для случая плоской теории упругости
8. Обосновать преимущества и недостатки вариационных постановок на основе принципов Ла-гранжа и Кастильяно
9. Обосновать применение билинейной аппроксимации для задачи теории упругости в перемещениях с точки зрения применения критерия полноты.
10. Сформулировать критерий полноты. Показать эквивалентность альтернативных формулировок в виде одного и двух утверждений

5.3.4 Типовые задания (оценочное средство - Практическое задание) для оценки сформированности компетенции ПК-3

1. Записать основной алгоритм МКЭ
2. Записать алгоритм вычисления матрицы жесткости изопараметрического КЭ

3. Записать алгоритм вычисления вектора эквивалентных узловых сил от объемной нагрузки
4. Записать алгоритм вычисления вектора эквивалентных узловых сил от поверхностной нагрузки, заданной в глобальной (общей) системе координат.
5. Записать алгоритм вычисления вектора эквивалентных узловых сил от поверхностной нагрузки, заданной в глобальной (общей) системе координат.
6. Записать алгоритм вычисления вектора эквивалентных узловых сил от поверхностной нагрузки, заданной в локальной системе координат, связанной с границей.
7. Сформулировать способ построения и нумерации узлов для семейства четырехугольных конечных элементов произвольного порядка Лагранжева семейства.
8. Сформулировать способ построения и нумерации узлов для семейства треугольных конечных элементов произвольного порядка

Критерии оценивания (оценочное средство - Практическое задание)

| 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 ошибки. |
| 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. Галлагер Ричард. Метод конечных элементов : основы / пер. с англ. В. М. Картвелишвили ; под ред. Н. В. Баничука. - М. : Мир, 1984. - 428 с. : ил. - 2.40., 3 экз.
2. Образцов Иван Филиппович. Метод конечных элементов в задачах строительной механики

летательных аппаратов : учеб. пособие для студентов авиац. специальностей вузов. - М. : Высшая школа, 1985. - 391 с. - 1.10., 1 экз.

Дополнительная литература:

1. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике : пер. с англ. / под ред. Б. Е. Победри. - М. : Мир, 1975. - 541 с. : ил. - 2.70., 2 экз.
2. Стренг Гилберт. Теория метода конечных элементов / пер. с англ. В. И. Агошкова [и др.] ; под ред. Г. И. Марчука. - М. : Мир, 1977. - 349 с. : ил. - 1.73., 5 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. Норри Д. Введение в метод конечных элементов / пер. с англ. Г. В. Демидова, А. Л. Урванцева ; под ред. Г. И. Марчука. - М. : Мир, 1981. - 304 с. : ил. - 1.40., 4 экз.
5. Рикардс Роланд Брунович. Метод конечных элементов в теории оболочек и пластин / Риж. политехн. ин-т им. А. Я. Пельше. - Рига : Зинатне, 1988. - 284 с. : ил. - 1.20., 1 экз.
6. Голованов Александр Иванович. Введение в метод конечных элементов статики тонких оболочек / АН СССР, Казан. фил., Физ.-техн. ин-т. - Казань : [б. и.], 1989. - 269 с. : ил. - 1.10., 1 экз.
7. Васидзу Кюнтиро. Вариационные методы в теории упругости и пластичности / пер. с англ. В. В. Кобелева, А. П. Сейраняна ; под ред. Н. В. Баничука. - М. : Мир, 1987. - 542 с. : ил. - 50.00., 4 экз.

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

1. <http://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/mathematics/difgeometry.htm>
ANSYS Help версии 15, 16, 17
2. <http://www.emt.ru>
3. <http://www.fea.ru/>
4. <http://www.cae.ru/>
5. <http://mysopromat.ru/cgi-bin/yabb2/YaBB.pl?catselect=feaprogramms>
6. Капустин С.А. Метод взвешенных невязок решения задач механики деформируемых тел и теплопроводности: учебно-методическое пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2010. – 60 с. (<http://www.unn.ru/pages/e-library/methodmaterial/files/19.pdf>).
7. Деклу Ж. Метод конечных элементов, перев. с фр. М.: Мир, 1976. 96 с. (<http://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/books/Deklu1976ru.djvu>).

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных образовательной программой, оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран), техническими средствами обучения.

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 по направлению подготовки 15.03.03 - Прикладная механика.

Автор(ы): Сергеев Олег Анатольевич, кандидат технических наук, доцент.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 10.10.2023 г., протокол № 2.