

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
президиумом Ученого совета ННГУ
от 14.12.2021 г. протокол № 4

Рабочая программа дисциплины

Численные методы в механике деформируемого твёрдого тела

(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)

Нижегород
2022 год

1. Место дисциплины в структуре ООП

Дисциплина «Численные методы в механике деформируемого твёрдого тела» относится к части формируемой участниками образовательных отношений.

| № варианта | Место дисциплины в учебном плане образовательной программы | Стандартный текст для автоматического заполнения в конструкторе РПД |
|------------|---|--|
| 2 | Блок 1. Дисциплины (модули) Часть, формируемая участниками образовательных отношений | Дисциплина Б1.В.11, «Численные методы в механике деформируемого твёрдого тела» относится к части ООП направления подготовки 01.03.03 Механика и математическое моделирование, формируемой участниками образовательных отношений. |

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** | |
| ПК-2. Способен анализировать поставленную задачу, использовать корректные методы её решения, применять математически сложные алгоритмы в современных специализированных программных комплексах, реализовывать в них новые алгоритмы | ПК-2.1. Знает теоретические основы и методологию построения решений фундаментальных задач механики, основы информационных технологий. | Знает вариационные постановки статических и динамических задач теории упругости и строительной механики и алгоритмы их решения методом конечных элементов. | <i>Собеседование</i> |
| | ПК-2.2. Умеет осуществлять анализ и выбор методов и алгоритмов решения задач профессиональной деятельности. | Умеет осуществлять анализ и выбор формулировок и методов решения статических и динамических задач теории упругости и строительной механики. | <i>Собеседование</i> |
| | ПК-2.3. Владеет навыками решения задач механики в соответствии с выбранным методом и построенным | Владеет навыками решения задач теории упругости и строительной механики методом конечных элементов с использованием современных программных комплексов/ | <i>Собеседование</i> |

| 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** | |
| | алгоритмом с использованием современных программных комплексов. | | |
| ПК-3. Умеет разрабатывать, исследовать, применять математические модели для расчётов, проводить расчётно-экспериментальные работы и исследования, обработку результатов, оформление отчётной документации | ПК-3.1. Знает классические модели механики, методы решения задач, современные программные комплексы для проведения расчётных исследований, методы проведения, обработки и анализа результатов экспериментальных исследований. | Знает классические модели теории упругости и строительной механики, методы решения задач, современные программные комплексы для проведения расчётных исследований. | <i>Собеседование</i> |
| | ПК-3.2. Умеет проводить расчётно-экспериментальные исследования, выбирать и применять современные программные комплексы, получать, обрабатывать и анализировать результаты исследований. | Умеет выбирать и применять современные программные комплексы, проводить численные исследования, обрабатывать и анализировать результаты. | <i>Расчётно-графическая</i> |
| | ПК-3.3. Владеет навыками применения математического моделирования и расчётно-экспериментальных исследований. | Владеет навыками применения метода конечных элементов при численном решении задач теории упругости и строительной механики | <i>Расчётно-графическая</i> |

3. Структура и содержание дисциплины

3.1. Трудоемкость дисциплины

| | |
|--|--------------------|
| | очная форма |
|--|--------------------|

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

3.2. Содержание дисциплины

| Очная форма обучения | | | | | | |
|--|--------------|---|--------------------|--------------------|-------|------------------------|
| Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины | Всего (часы) | в том числе | | | | СР ¹ , часы |
| | | Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы | | | | |
| | | из них | | | | |
| | | З.ЛеГ ² | З.СеГ ³ | З.ЛаГ ⁴ | Всего | |
| Введение | 8 | 2 | | | 2 | 6 |
| Постановки задач | 23 | 4 | 4 | | 8 | 15 |
| Методы численного решения | 25 | 4 | 6 | | 10 | 15 |
| Возможности системы ANSYS | 21 | 4 | 6 | | 10 | 11 |
| Метод конечных элементов | 31 | 8 | 8 | | 16 | 15 |
| Решение плоских и трёхмерных задач | 32 | 8 | 8 | | 16 | 16 |
| Обзор курса | 2 | 2 | | | 2 | |
| Текущий контроль | 2 | | | | 2 | |
| Итого: | 144 | 32 | 32 | | 66 | 78 |
| ¹ Самостоятельная работа обучающегося. ² Занятия лекционного типа. ³ Занятия семинарского типа. ⁴ Занятия лабораторного типа. | | | | | | |

Краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля)

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

Текущий контроль успеваемости реализуется в рамках занятий семинарского типа. Промежуточная аттестация проходит в традиционных формах (экзамен).

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 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 промежуточному контролю успеваемости (экзамен).

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 расчетно-графических работ, собеседования и промежуточной аттестации в форме вопросов и заданий к экзамену.

5.1. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине

| Шкала оценивания сформированности компетенций | | Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения 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 |
| | | 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. | Продемонстрированы 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 | Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами. | Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми недочетами. |
| очень хорошо | | Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок | Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами. | Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов. |
| отлично | | Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки, без ошибок. | Продемонстрированы все основные умения, решены все основные задачи с отдельными несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме. | Продемонстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов. |

| Шкала оценивания сформированности компетенций | Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций) | | |
|---|--|--|---|
| | Знания | Умения | Навыки |
| превосходно | Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки. | Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов | Продемонстрирован творческий подход к решению нестандартных задач |

Шкала оценки при промежуточной аттестации

| Оценка | | Уровень подготовки |
|----------|---------------------|--|
| зачено | 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» |
| незачено | 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 |
|--|-----------------------------|
| 1. Основная идея МКЭ. | ПК-2 |
| 2. Метод Рунге на кусочно-гладких базисных функциях | ПК-2 |
| 3. Общая схема МКЭ. | ПК-2, ПК-3 |
| 4. Локальная и глобальная системы координат. Преобразование матрицы жесткости и вектора узловых сил КЭ при переходе к новой системе координат. | ПК-2 |
| 5. Локальная и глобальная нумерация неизвестных. Составление глобальной матрицы жесткости системы. Полуширина ленты СЛАУ. Рациональная и нерациональная нумерация узлов. | ПК-2 |

| | |
|---|------|
| 6. Учет граничных условий | ПК-2 |
| 7. Учет граничных условий в системе координат, не совпадающей с глобальной. | ПК-2 |
| 8. Вычисление внутренних усилий в элементах фермы. | ПК-2 |
| 9. Особенности расчета пространственных ферм. | ПК-2 |
| 10. Дифференциальная и вариационная постановки задачи плоской задачи теории упругости. | ПК-2 |
| 11. Треугольный элемент с линейными функциями формы. | ПК-2 |
| 12. Четырехугольный элемент с билинейными функциями формы. | ПК-2 |
| 13. Анализ аппроксимаций перемещений. Ложный сдвиг. Моментная схема конечных элементов. | ПК-2 |
| 14. Гибридная формулировка, основанная на предположении о законе изменения напряжений. | ПК-2 |
| 15. Прямоугольные КЭ. Сирендипово семейство функций формы. | ПК-2 |
| 16. Прямоугольные КЭ. Лагранжево семейство функций формы. | ПК-2 |
| 17. Семейство треугольных элементов. Естественные координаты. | ПК-2 |
| 18. Криволинейные конечные элементы. Аппроксимация геометрии КЭ. Суб-, изо- и суперпараметрические КЭ. | ПК-2 |
| 19. Технология построения матрицы жесткости изопараметрических КЭ. Численное интегрирование. Квадратурные формулы Гаусса. Выбор необходимого порядка точности интегрирования. | ПК-2 |
| 20. КЭ для решения задач изгиба пластин. Проблема совместности. | ПК-2 |
| 21. Четырех и треугольные КЭ для пластин по модели Кирхгофа. | ПК-2 |
| 22. Расчет пространственных и оболочечных систем. Конечные элементы стержней и пластин по модели Рейснера-Тимошенко. Требование C0 непрерывности базисных функций. | ПК-2 |
| 23. Изопараметрические элементы для расчета пластин и оболочек. | ПК-2 |
| 24. Понятие и определение точности, сходимости и устойчивости численного метода. | ПК-2 |
| 25. Ошибки, возникающие при применении МКЭ. Анализ ошибок вычислений. Число обусловленности матриц СЛАУ. Зависимость числа обусловленности от различных факторов. | ПК-3 |
| 26. Совместные элементы. Критерий полноты. | ПК-2 |
| 27. Несовместные элементы. Кусочный тест Айронса. | ПК-2 |
| 28. Анализ сходимости решений для различных типов конечных элементов. | ПК-3 |

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

1. Записать принцип Лагранжа для случая плоской теории упругости
2. Сформулировать критерий полноты. Показать эквивалентность альтернативных формулировок в виде одного и двух утверждений

5.2.3. Типовые задания/задачи для оценки сформированности компетенции ПК-3

1. Характеризовать методы решения систем линейных уравнений в программном комплексе ANSYS
2. Записать основной алгоритм МКЭ

5.3. Пример экзаменационного билета

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 1

1. Дифференциальная и вариационная постановки задачи теории упругости.
2. Анализ ошибок вычислений. Число обусловленности матриц СЛАУ. Зависимость числа обусловленности от различных факторов.

6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

| № | а) основная литература: | К-во ¹ |
|----|--|-------------------|
| 1. | 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). | Э |
| 2. | Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы. М.: Мир, 1984. - 428 с. - 3экз. https://dwg.ru/dnl/3236 | Э, 3 экз. |
| 3. | Образцов И.Ф., Савельев Л.М., Хазанов Х.С. Метод конечных элементов в задачах строительной механики летальных аппаратов. М.: ВШ, 1985. . - 391 с. - 3экз. http://bookfi.net/book/543719 | Э |

| № | б) дополнительная литература: | К-во ¹ |
|----|---|-------------------|
| 1. | Деклу Ж. Метод конечных элементов, перев. с фр. М.: Мир, 1976. 96 с. (http://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/books/Deklu1976ru.djvu). | Э |
| 2. | Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике, перев с англ. М.: Мир, 1975. 543 с. (http://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/books/Zenkevich1975ru.djvu). | Э |
| 3. | Стренг Г., Фикс Дж. Теория метода конечных элементов, перев. с англ. М.: Мир, 1977. 351 с. (http://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/books/StrengFiks1977ru.djvu). | Э |
| 4. | Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979. . - 392 с. - 5экз. | Э |
| 5. | Норри Дж., Де Фриз Ж. Введение в метод конечных элементов. М.-: Мир, 1981. - 304 с. - 5экз | 1 |
| 6. | Рикарде Р.Б. Метод конечных элементов в теории пластин и оболочек. Рига.: Зинатне, 1988. | 1 |
| 7. | Голованов А.И., Корнишин М.С. Введение в метод конечных элементов статики тонких оболочек. Казань, 1989, - 269 с. - 1экз.. | – |
| 8. | Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности. М.: Мир, 1987. - 542 с.. - 4экз.. | – |

| № | в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы (в соответствии с содержанием дисциплины) | «Л» или «С» ² |
|----|---|--------------------------|
| 1. | http://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/mathematics/difgeometry.htm | С |
| 2. | ANSYS Help версии 15, 16, 17 | |

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

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

| № | в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы (в соответствии с содержанием дисциплины) | «Л» или «С» ² |
|----|---|--------------------------------|
| 3. | http://www.emt.ru | |
| 4. | http://www.fea.ru/ | |
| 5. | http://www.cae.ru/ | |
| 6. | http://mysopromat.ru/cgi-bin/yabb2/YaBB.pl?catselct=feaprogramms | |
| 7. | | |

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). Компьютерные классы 2 и 6 корпусов ННГУ, лицензионные программы ANSYS Academic Teaching Advanced (25 Tasks) – 2 лицензии.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечены доступом в электронную информационно-образовательную среду.

Программа составлена в соответствии с требованиями ОС ННГУ 01.03.03 Механика и математическое моделирование

Автор(ы) _____ к.т.н., доцент
Леонтьев Н.В

Рецензент(ы) _____

Заведующий кафедрой
теоретической,
компьютерной и
экспериментальной
механики _____ д.ф.-м.н., профессор
Игумнов Л.А.

Программа одобрена на заседании методической комиссии института информационных технологий, математики и механики

от 01.12.2021 года, протокол № 2.