

Белорусский государственный университет



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе и образовательным инновациям

О.Н. Здрок

«02» июля 2021 г.

Регистрационный № УД – 10436/уч.

Компьютерная механика

**Учебная программа учреждения высшего образования
по учебной дисциплине для специальности**

1-31 03 02 Механика и математическое моделирование

Минск, 2021 г.

Учебная программа составлена на основе образовательного стандарта ОСВО 1-31 03 02-2013 утвержденного и введенного в действие постановлением Министерства образования Республики Беларусь от 30.08.2013 № 88, учебного плана №G31-136/уч. от 30.05.2013.

СОСТАВИТЕЛИ:

Мармыш Денис Евгеньевич – доцент кафедры теоретической и прикладной механики механико-математического факультета Белорусского государственного университета, кандидат физико-математических наук, доцент.

Лопатин Сергей Николаевич – ассистент кафедры теоретической и прикладной механики механико-математического факультета Белорусского государственного университета.

РЕЦЕНЗЕНТ:

Чигарев Виталий Анатольевич – доцент кафедры «Теоретическая механика и механика материалов» машиностроительного факультета Белорусского национального технического университета, кандидат физико-математических наук, доцент.

РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:

Кафедрой теоретической и прикладной механики механико-математического факультета Белорусского государственного университета (протокол № 10 от 19.05.2021)

Научно-методическим Советом БГУ
(протокол № 7 от 30.06.2021)

Зав.кафедрой _____

М.А. Журавков

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

В настоящее время средства вычислительной техники, компьютеры и программные комплексы (пакеты программ) стали неотъемлемой частью работы механика-исследователя и механика-прикладника. Решение прикладных задач всех разделов механики не представляется возможным без использования современных вычислительных инструментов.

Проблемы и задачи актуальных фундаментальных и прикладных исследований, а также инженерных расчетов, связанных с изучением поведения и состояния сложных механических систем и конструкций, невозможно эффективно решать без интенсивного использования компьютерных технологий. Причем, последние охватывают различные аспекты компьютерного моделирования: от формулировки и постановки модельных задач до вычислений, интерпретаций и анализа результатов расчетов, а также верификации данных экспериментальных исследований.

Сегодня практически все производственные предприятия, научно-исследовательские и проектные организации, конструкторские бюро и технологические компании имеют или разрабатывают автоматизированные компьютерные системы для эффективного решения задач организации. В наши дни компьютерное моделирование физических процессов активно применяется в машиностроении, судостроении, авиастроении, промышленном и гражданском строительстве, биоинженерии, геотехнике и других высокотехнологичных и наукоемких отраслях промышленности. Так, например, классические концепции механики сплошных и дискретных сред совместно с современными вычислительными программными комплексами используются для расчётов прочности, устойчивости и долговечности различных механических систем.

С развитием науки и техники узкоспециальные знания довольно быстро устаревают. В связи с этим, для решения возникающих принципиально новых актуальных прикладных задач научные работники и инженеры должны не только обладать хорошей подготовкой в области фундаментальных наук и иметь высокую способность к самообразованию, но и владеть современными вычислительными средствами и информационными технологиями. Это требует постоянного всестороннего совершенствования вузовского образования. В области прикладной механики наиболее популярными вычислительными средствами являются системы автоматизированного проектирования (САПР) и конечно-элементные программные комплексы, которые изучаются в данном курсе. Наиболее перспективный путь лежит именно в повышении значимости общенаучных и прикладных дисциплин в учебных планах подготовки будущих научных работников и инженеров, в совершенствовании преподавания таких фундаментальных дисциплин, как физика, математика и механика, их компьютерных приложений.

Цель учебной дисциплины – обучить студентов автоматизированному проектированию инженерных систем при помощи современных САПР типа САД и компьютерному моделированию и физических процессов при помощи

САПР типа САЕ. Изучение данного предмета предусматривает также ознакомление с аналитическими и численными методами решения задач механики технических систем, положенными в основу прикладных систем автоматизированного инженерного анализа, а также обучение методам инженерного анализа механических систем.

Образовательная цель: изучение основ метода конечных элементов и его использование в теоретической механике, сопротивлении материалов и механике сплошных сред, а также изучение инструментов и методов компьютерного моделирования в механике.

Развивающая цель: освоение и апробация приемов компьютерного моделирования и численных методов применительно к исследованиям механических процессов в сплошных средах.

Задачи учебной дисциплины:

а) сформировать у студентов представление о методах численного решения задач теоретической механики, сопротивления материалов и механики сплошных сред;

б) выработать у студентов навыки расчета напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов;

в) сформировать у студентов навыки анализа численных результатов решения задач теоретической механики, сопротивления материалов и механики сплошных сред;

г) научить студентов применять современные информационные технологии к решению прикладных и исследовательских задач теоретической механики, сопротивления материалов и механики сплошных сред.

Место учебной дисциплины в системе подготовки специалиста с высшим образованием.

Учебная дисциплина относится к циклу специальных дисциплин компонента учреждения высшего образования и является дисциплиной по выбору студента.

Как прикладная дисциплина «Компьютерная механика» является приложением таких дисциплин как «Теоретическая механика», «Сопротивление материалов и основы строительной механики», «Механика сплошной среды». Она также служит средством формирования у будущих специалистов необходимых творческих навыков к построению математических моделей происходящих в природе и технике процессов, а также помогает совершенствованию способностей к научным обобщениям и выводам.

В результате изучения дисциплины «Компьютерная механика» обучаемый студент должен:

знать:

– аналитические и численные методы решения различных типов задач механики технических систем, положенные в основу прикладных систем автоматизированного инженерного анализа (САЕ);

– основы метода конечных элементов (МКЭ) и особенности его программной реализации;

- основные принципы компьютерного моделирования механических систем и физических процессов, а также этапы решения соответствующих задач;
- основные математические модели, описывающие механическое поведение сплошных сред при различных условиях;
- алгоритмы, методы, принципы создания компьютерных моделей и порядок решения задач в пакетах компьютерной механики (на примере ANSYS, Solid Works);

уметь:

- проектировать детали, элементы и узлы машин и механизмов, а также более сложные многокомпонентные механические системы при помощи современных САПР;
- составлять матрицу жесткости и формировать систему разрешающих уравнений для определения напряженно-деформированного состояния;
- использовать пакеты прикладных систем автоматизированного инженерного анализа ANSYS, SolidWorks для решения задач теории упругости, пластичности, вязкоупругости, кинематики, динамики технических систем и анализа физических процессов, происходящих в этих системах;
- решать задачи о прочности, устойчивости и долговечности механических систем при помощи современных CAE пакетов;
- выполнять полный цикл компьютерного моделирования процессов механики, начиная с постановки задачи и построения компьютерной модели механической системы, заканчивая заданием корректных граничных условий, произведением численных расчётов и анализом полученных результатов, а также уметь делать корректные выводы о состоянии рассматриваемых систем и давать рекомендации по их оптимизации.

владеть:

- методами построения расчетных моделей;
- навыками анализа механических процессов, протекающих в сплошных средах.

Требования к компетенциям:

В результате изучения дисциплины «Компьютерная механика» студент должен обладать следующими компетенциями:

Академические компетенции:

АК-1. Уметь применять базовые научно-теоретические знания для решения теоретических и практических задач.

АК-2. Владеть системным и сравнительным анализом.

АК-3. Владеть исследовательскими навыками.

АК-4. Уметь работать самостоятельно.

АК-5. Быть способным вырабатывать новые идеи (обладать креативностью).

АК-6. Владеть междисциплинарным подходом при решении проблем.

АК-7. Иметь навыки, связанные с использованием технических устройств, управлением информацией и работой с компьютером.

АК-8. Владеть навыками устной и письменной коммуникации.

Социально-личностные компетенции:

СЛК-2. Быть способным к социальному взаимодействию.

СЛК-3. Владеть способностью к межличностным коммуникациям.

СЛК-5. Быть способным к критике и самокритике.

СЛК-6. Уметь работать в команде.

Профессиональные компетенции:

ПК-7. Проводить исследования в области эффективности решения производственных задач.

ПК-8. Работать с научной, нормативно-справочной и специальной литературой, разрабатывать и использовать современное учебно-методическое обеспечение;

ПК-9. Вести преподавательскую работу в учреждениях высшего и среднего специального образования в соответствии с полученной квалификацией.

ПК -14. Взаимодействовать со специалистами смежных профилей.

ПК -18. Готовить доклады, материалы к презентациям.

ПК -24. Работать с научной, технической и патентной литературой.

ПК -27. Разрабатывать новые информационные технологии на основе проектирования механических схем и систем, проводимым к математическим моделям их оптимизациям.

ПК -28. Применять методы анализа и организации внедрения инноваций.

ПК -29. Реализовывать инновационные проекты в профессиональной деятельности.

Структура учебной дисциплины

Учебная дисциплина «Компьютерная механика» изучается в 5 и 6 семестрах дневной формы получения образования.

Всего на изучение дисциплины отведено 312 часов, в том числе 140 аудиторных часов, из них:

- в 5 семестре - 132 часа, в том числе 72 аудиторных часа, из них: лекции – 36 часов, лабораторные занятия – 32 часа, управляемая самостоятельная работа – 4 часа.

Трудоемкость учебной дисциплины составляет 3 зачетные единицы.

Форма текущей аттестации – зачет.

- в 6 семестре отведено 180 часов, в том числе 68 аудиторных часов, из них: лекции – 18 часов, лабораторные занятия – 44 часа, управляемая самостоятельная работа – 6 часов.

Трудоемкость учебной дисциплины составляет 5 зачетных единиц.

Форма текущей аттестации – экзамен.

СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

Тема I. Введение в компьютерную механику

Основные понятия и определения. Взаимосвязь виртуального моделирования, проектирования и производства. История развития компьютерного моделирования. Обзор программ компьютерного моделирования и компьютерной механики. Основные технологии компьютерного моделирования: CAD/CAE/CAM (CAx technologies).

Тема II. Геометрическое моделирование. Математические модели компьютерной графики

Элементарные геометрические объекты. Двумерные преобразования. Пространственные преобразования и проекции. Плоские кривые. Пространственные кривые. Сплайны (кубические сплайны и B-сплайны). Кривые Безье. Поверхности. Кусочное представление поверхностей. Поверхности Безье. Твердые тела и примитивы.

Тема III. Методы геометрического моделирования в САПР

Моделирование 1D, 2D и 3D механических систем. Проволочное моделирование. Поверхностное моделирование. Твёрдотельное моделирование. Моделирование ансамблей и сборок.

Тема IV. Этапы компьютерного моделирования процессов механики

Выбор корректных математических моделей для описания механического поведения материалов и задание соответствующих физико-механических свойств. Создание геометрической модели исследуемого объекта. Конечно-элементная сетка и некоторые особенности ее построения. Типы граничных условий и способы их задания. Формирование системы разрешающих уравнений и ее решение. Постпроцессинг.

Тема V. Метод перемещений

Кинематический анализ. Построение основной системы. Схемы нагружения однопролетных статически неопределимых балок. Канонические уравнения метода перемещений. Определение коэффициентов и свободных членов канонических уравнений. Определение внутренних силовых факторов в поперечных сечениях стержневой системы. Примеры.

Тема VI. Вычислительная механика стержневых систем

Основные понятия и определения метода упругих жесткостей. Система разрешающих уравнений. Стержневой и балочных элементы. Фермы и рамы. Локальная и глобальная системы координат. Матрица преобразования. Коэффициент жесткости. Матрицы жесткости стержневого и балочного элемента. Матрица жесткости элемента в локальной и глобальной системах координат и ее свойства. Формирование матрицы жесткости плоской стержневой системы. Свойства глобальной матрицы жесткости. Способы учета граничных условий (формирование векторов узловых перемещений и нагрузок). Расчет пространственных стержневых систем.

Тема VII. Методы решения систем линейных алгебраических уравнений

Системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Метод Гаусса. Итерационные методы решения СЛАУ. Метод последовательных приближений. Метод полной релаксации. Неполная релаксация. Теорема сходимости.

Тема VIII. Динамические задачи стержневых систем

Динамика системы с одной степенью свободы. Частота, период, амплитуда. Свободные и вынужденные колебания. Затухающие колебания. Динамика системы с несколькими степенями свободы. Сдвиговые колебания систем. Динамика плоской фермы. Динамика пространственной фермы. Динамический анализ рам. Динамический анализ систем с распределенными свойствами. Анализ системы на сейсмическое нагружение.

Тема IX. Проблема собственных значений. Методы решения

Полная и частичная проблема собственных значений. Метод Крылова. Метод Данилевского. Методы решения проблемы собственных значений симметричных матриц. Метод Якоби.

Тема X. Нелинейные задачи вычислительной механики стержневых систем

Понятия геометрической и физической нелинейности. Нелинейности граничных условий. Модели для описания физической нелинейности материала. Подходы Эйлера и Лагранжа для описания перемещений. Тензор Грина. Тензор Пиолы-Кирхгофа. Нелинейная модель стержневого элемента. Формирование матрицы жесткости с учетом нелинейности задачи.

Тема XI. Численные методы решения нелинейных алгебраических уравнений и их систем

Метод простых итераций. Метод Ньютона. Системы нелинейных алгебраических уравнений. Матрица Якоби. Метод Зейделя для систем нелинейных уравнений. Метод Ньютона-Рафсона. Теорема о сходимости метода Ньютона-Рафсона.

Тема XII. Метод взвешенных невязок

Вариационные принципы механики деформируемого тела. Система линейно независимых функций. Понятие невязки. Метод коллокаций. Метод коллокаций с подобластями. Численная реализация. Примеры.

Тема XIII. Введение в метод конечных элементов

Основные понятия и определения метода конечных элементов. Узлы и элементы. Конечно-элементная сетка. Степени свободы. Матрица жесткости элемента. Дискретизация. Преобразование координат. Система разрешающих уравнений.

Тема XIV. Одномерные конечные элементы

Стержневой конечный элемент (КЭ) и его матрица жесткости. Балочный конечный элемент и его матрица жесткости. Функции формы одномерных конечных элементов. Обобщенный одномерный КЭ. Использование одномерных КЭ при расчете ферм и рам.

Тема XV. Плоские конечные элементы

Треухвзловой и четырехвзловой конечные элементы. Степени свободы. Характеристики элемента. Функции формы. Матрица жесткости элемента. Узловые силы. Объемные силы. Система разрешающих уравнений. Анализ плоского напряженного состояния. Решение осесимметричных задач. Примеры.

Тема XVI. Конечные элементы высших порядков

Шестиузловой треугольный конечный элемент и его характеристики. Возьмиузловой четырехугольный конечный элемент и его характеристики. Формирование матриц жесткости. Методы численного интегрирования.

Тема XVII. Трехмерные конечные элементы

Тетраэдральный элемент и его характеристики. Элемент в виде прямоугольной призмы. Функции формы трехмерного КЭ. Исследование трехмерного напряженно-деформированного состояния. Примеры.

Тема XVIII. Метод конечных элементов в динамических задачах механики деформируемого твердого тела

Дискретизация в нестационарных задачах. Решение задач с упругим демпфированием. Матрица масс и матрица демпфирования. Решение задач о плоском напряженном и плоском деформированном состоянии. Примеры.

Тема XIX. Типы задач компьютерной механики и методы их решения

Статистические задачи прочности деталей, конструкций и других механических систем. Упругие, упругопластические и вязкоупругие постановки задач компьютерной механики. Контактные задачи. Задачи на расчёт собственных колебаний и потери устойчивости. Задачи теплопроводности. Сопряженные задачи. Термомеханические задачи. Преднагруженный модальный анализ. Задачи кинематики и динамики.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Дневная форма получения образования с применением электронных средств обучения (ДО)

Номер раздела, темы, занятия	Название раздела, темы, занятия: перечень изучаемых вопросов	Количество аудиторных часов						Форма контроля знаний
		лекции	практические занятия	семинарские занятия	лабораторные занятия	иное	Количество часов УСР	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
5 семестр								
1	Введение в компьютерную механику Основные понятия и определения. Взаимосвязь виртуального моделирования, проектирования и производства. История развития компьютерного моделирования. Обзор программ компьютерного моделирования и компьютерной механики. Основные технологии компьютерного моделирования: CAD/CAE/CAM (CAx technologies).	2						Вопросы для самопроверки, устный опрос
2	Геометрическое моделирование. Математические модели компьютерной графики Элементарные геометрические объекты. Двумерные преобразования. Пространственные преобразования и проекции. Плоские кривые. Пространственные кривые. Сплайны (кубические сплайны и B-сплайны). Кривые Безье. Поверхности. Кусочное представление поверхностей. Поверхности Безье. Твердые тела и примитивы.	2			2			Вопросы для самопроверки, устный опрос, решение задач

3	Методы геометрического моделирования в САПР Моделирование 1D, 2D и 3D механических систем. Проволочное моделирование. Поверхностное моделирование. Твердотельное моделирование. Моделирование ансамблей и сборок.	2			2			Вопросы для самопроверки, устный опрос, решение задач
4	Этапы компьютерного моделирования процессов механики Выбор корректных математических моделей для описания механического поведения материалов и задание соответствующих физико-механических свойств. Создание геометрической модели исследуемого объекта. Конечно-элементная сетка и некоторые особенности ее построения. Типы граничных условий и способы их задания. Формирование системы разрешающих уравнений и ее решение. Постпроцессинг.	4			2			
5	Метод перемещений Кинематический анализ. Построение основной системы. Схемы нагружения однопролетных статически неопределимых балок. Канонические уравнения метода перемещений. Определение коэффициентов и свободных членов канонических уравнений. Определение внутренних силовых факторов в поперечных сечениях стержневой системы. Примеры.	2			4			Вопросы для самопроверки, устный опрос, решение задач
6	Вычислительная механика стержневых систем Основные понятия и определения метода упругих жесткостей. Система разрешающих уравнений. Стержневой и балочных элементы. Фермы и рамы. Локальная и глобальная системы координат. Матрица преобразования. Коэффициент жесткости. Матрицы жесткости стержневого и балочного элемента. Матрица жесткости элемента в локальной и глобальной системах координат и ее свойства. Формирование матрицы жесткости плоской	10			6		2	Вопросы для самопроверки, устный опрос, решение задач, отчет по индивидуальному заданию с устной защитой

	<p>стержневой системы. Свойства глобальной матрицы жесткости. Способы учета граничных условий (формирование векторов узловых перемещений и нагрузок). Расчет пространственных стержневых систем.</p>						
7	<p>Методы решения систем линейных алгебраических уравнений Системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Метод Гаусса. Итерационные методы решения СЛАУ. Метод последовательных приближений. Метод полной релаксации. Неполная релаксация. Теорема сходимости.</p>	2			2		<p>Вопросы для самопроверки, устный опрос, решение задач</p>
8	<p>Динамические задачи стержневых систем Динамика системы с одной степенью свободы. Частота, период, амплитуда. Свободные и вынужденные колебания. Затухающие колебания. Динамика системы с несколькими степенями свободы. Сдвиговые колебания систем. Динамика плоской фермы. Динамика пространственной фермы. Динамический анализ рам. Динамический анализ систем с распределенными свойствами. Анализ системы на сейсмическое нагружение.</p>	6			6		<p>Вопросы для самопроверки, устный опрос, решение задач</p>
9	<p>Проблема собственных значений. Методы решения Полная и частичная проблема собственных значений. Метод Крылова. Метод Данилевского. Методы решения проблемы собственных значений симметричных матриц. Метод Якоби.</p>	2			2		<p>Вопросы для самопроверки, устный опрос, решение задач</p>
10	<p>Нелинейные задачи вычислительной механики стержневых систем Понятия геометрической и физической нелинейности. Нелинейности граничных условий. Модели для описания физической</p>	2			4	2	<p>Вопросы для самопроверки, устный опрос, решение задач,</p>

	нелинейности материала. Подходы Эйлера и Лагранжа для описания перемещений. Тензор Грина. Тензор Пиолы-Кирхгофа. Нелинейная модель стержневого элемента. Формирование матрицы жесткости с учетом нелинейности задачи.							отчет по индивидуальному заданию с устной защитой
11	Численные методы решения нелинейных алгебраических уравнений и их систем Метод простых итераций. Метод Ньютона. Системы нелинейных алгебраических уравнений. Матрица Якоби. Метод Зейделя для систем нелинейных уравнений. Метод Ньютона-Рафсона. Теорема о сходимости метода Ньютона-Рафсона.	2			2			Вопросы для самопроверки, устный опрос, решение задач
6 семестр								
12	Метод взвешенных невязок Вариационные принципы механики деформируемого тела. Система линейно независимых функций. Понятие невязки. Метод коллокаций. Метод коллокаций с подобластями. Численная реализация. Примеры.	2						
13	Введение в метод конечных элементов Основные понятия и определения метода конечных элементов. Узлы и элементы. Конечно-элементная сетка. Степени свободы. Матрица жесткости элемента. Дискретизация. Преобразование координат. Система разрешающих уравнений.	2			2			Вопросы для самопроверки, устный опрос, решение задач, отчет по лабораторной работе с устной защитой
14	Одномерные конечные элементы Стержневой конечный элемент (КЭ) и его матрица жесткости. Балочный конечный элемент и его матрица жесткости.	4			2		2	Вопросы для самопроверки, устный опрос,

	Функции формы одномерных конечных элементов. Обобщенный одномерный КЭ. Использование одномерных КЭ при расчете ферм и рам.							решение задач, отчет по индивидуальному заданию с устной защитой
15	Плоские конечные элементы Трехузловой и четырехузловой конечные элементы. Степени свободы. Характеристики элемента. Функции формы. Матрица жесткости элемента. Узловые силы. Объемные силы. Система разрешающих уравнений. Анализ плоского напряженного состояния. Решение осесимметричных задач	2			4		2	Вопросы для самопроверки, устный опрос, решение задач, отчет по лабораторной работе с устной защитой; отчет по индивидуальному заданию с устной защитой
16	Конечные элементы высших порядков Шестиузловой треугольный конечный элемент и его характеристики. Возьмиузловой четырехугольный конечный элемент и его характеристики. Формирование матриц жесткости. Методы численного интегрирования.	2			4			Вопросы для самопроверки, устный опрос, решение задач, отчет по лабораторной работе с устной защитой
17	Трехмерные конечные элементы	2			4		2	Вопросы для самопроверки,

	Тетраэдральный элемент и его характеристики. Элемент в виде прямоугольной призмы. Функции формы трехмерного КЭ. Исследование трехмерного напряженно-деформированного состояния. Примеры.							устный опрос, решение задач, отчет по лабораторной работе с устной защитой; отчет по индивидуальному заданию с устной защитой
18	Метод конечных элементов в динамических задачах механики деформируемого твердого тела Дискретизация в нестационарных задачах. Решение задач с упругим демпфированием. Матрица масс и матрица демпфирования. Решение задач о плоском напряженном и плоском деформированном состоянии. Примеры.	2			6			
19	Типы задач компьютерной механики и методы их решения Статистические задачи прочности деталей, конструкций и других механических систем. Упругие, упругопластические и вязкоупругие постановки задач компьютерной механики. Контактные задачи. Задачи на расчёт собственных колебаний и потери устойчивости. Задачи теплопроводности. Сопряженные задачи. Термомеханические задачи. Преднагруженный модальный анализ. Задачи кинематики и динамики.	2			22			Вопросы для самопроверки, устный опрос, решение задач, отчет по лабораторной работе с устной защитой
	Всего	54			76		10	

ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Перечень основной литературы

1. *Gromyko O.V. et al.* Computer Mechanics: Introduction to FEA and CAD/CAE Systems. Minsk: BSU, 2011. – 303 p.
2. Басов К.А. ANSYS. Справочник пользователя. Москва: ДМК Пресс, 2012. – 639 с.
3. *Зенкевич О.* Метод конечных элементов в технике. М: Мир, 1975. – 541 с.
4. *Сегерлинд Л.* Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979. – 388 с.
5. *Ochsner A., Merkel M.* One-dimensional finite elements. An introduction to the FE method, 2nd ed. – Springer, 2018. – 418 p.
6. *Zohdi T.* A finite element primer for beginners. The basics, 2nd ed. – Springer, 2018. – 135 p.
7. *Ferreira A.J.M.* Matlab codes for finite element analysis. Solids and structures. – Springer, 2009. – 235 p.
8. *Kassimali, A.* Matrix analysis of structures, 2nd ed. – Cengage Learning, 2012. – 643 p.
9. *Paz M., Kim Y.H.* Structural dynamics. Theory and computation, 6th edition. – Springer, 2019. – 634 p.

Перечень дополнительной литературы

1. *Зенкевич О., Морган К.* Конечные элементы и аппроксимация. – М.: Мир 1986. – 318 с.
2. *Meirovitch L.* Computational methods in structural dynamics. – Sijthoff and Noordhoff, 1980. – 439 p.
3. *Ghaboussi J., Wu X.S.* Numerical methods in computational mechanics. – CRC Press, 2017. – 313 p.
4. *Moaveni S.* Finite Element Analysis. Theory and application with ANSYS. – Prentice Hall, NJ, 1999. –
5. *Chang K.-H.* Product Design Modeling using CAD/CAE, *Academic Press*, 2014. – 438 p.

Перечень рекомендуемых средств диагностики и методика формирования итоговой оценки

Диагностика результатов учебной деятельности по дисциплине «Компьютерная механика» проводится, как правило, во время аудиторных занятий. Для диагностики используются:

- вопросы для самопроверки;
- устный опрос;
- отчеты по индивидуальным заданиям с устной защитой;
- отчеты по лабораторным работам с устной защитой;
- решение задач.

Оценка за ответы на лекциях (опрос), практических и лабораторных занятиях включает в себя полноту ответа, наличие аргументов, примеров из практики.

Контрольные мероприятия проводятся в соответствии с учебно-методической картой дисциплины.

Для студентов, пропустивших контрольные мероприятия или получивших неудовлетворительную оценку, решение о повторном проведении контрольного мероприятия выносится в соответствии с положением о рейтинговой системе оценки знаний студентов по дисциплине в Белорусском государственном университете.

Формой текущей аттестации по дисциплине «Компьютерная механика» учебным планом предусмотрен в 5 семестре – зачет, в 6 семестре – экзамен.

При формировании итоговой оценки используется рейтинговая оценка знаний студента, дающая возможность проследить и оценить динамику процесса достижения целей обучения. Рейтинговая оценка предусматривает использование весовых коэффициентов для текущего контроля знаний и текущей аттестации студентов по дисциплине.

Примерные весовые коэффициенты, определяющие вклад текущего контроля знаний и текущей аттестации в рейтинговую оценку:

Формирование оценки за текущую успеваемость:

- ответы на устный опрос – 10 %;
- решение задач – 20 %;
- отчет по индивидуальным заданиям с устной защитой – 70 %.

Рейтинговая оценка по дисциплине рассчитывается на основе оценки текущей успеваемости и экзаменационной оценки с учетом их весовых коэффициентов. Вес оценки по текущей успеваемости составляет 40 %, экзаменационная оценка – 60 %.

Примерный перечень заданий для управляемой самостоятельной работы студентов

Тема 6. Вычислительная механика стержневых систем (2 ч)

Построить эпюры внутренних усилий в многопролетной балке при помощи возможностей САПР SolidWorks. Задание включает в себя создание компьютерных моделей балок различной геометрии, а также построение эпюр поперечных сил, изгибающих моментов, прогибов и напряжений для полученных балок.

Форма контроля – отчет по индивидуальному заданию.

Тема 10. Нелинейные задачи вычислительной механики стержневых систем (2 ч)

Анализ напряженного состояния стержневых систем в статической упругой, вязкоупругой и упругопластической постановке при помощи возможностей САПР SolidWorks. Индивидуальное задание включает в себя создание трехмерной твердотельной модели, а также расчёт напряженного состояния полученной системы под действием статических нагрузок. Кроме того, по результатам выполнения индивидуального задания необходимо выполнить оценку прочности системы согласно классическим теориям прочности.

Форма контроля – отчет по индивидуальному заданию.

Тема 14. Одномерные конечные элементы (2 ч)

Построение эпюр балок при помощи возможностей программного комплекса ANSYS Mechanical APDL. Индивидуальное задание включает в себя создание компьютерных моделей многопролетных балок различного поперечного сечения, а также построение эпюр поперечных сил, изгибающих моментов, прогибов и напряжений для полученных балок посредством написания программного кода на языке APDL с использованием возможностей ANSYS Mechanical APDL.

Форма контроля – отчет по индивидуальному заданию.

Тема 15. Плоские конечные элементы (2 ч)

Анализ плоского напряженного состояния деталей в статической упругой постановке при помощи возможностей программного комплекса ANSYS Mechanical APDL. Индивидуальное задание включает в себя создание твердотельной модели плоской детали, а также расчёт НДС полученной детали под действием статических нагрузок с использованием возможностей ANSYS Mechanical APDL.

Форма контроля – отчет по индивидуальному заданию.

Тема 17. Трехмерные конечные элементы (2 ч)

Анализ напряженно-деформированного состояния трёхмерных деталей с использованием упругопластических моделей поведения материала при по-

мощи возможностей программного комплекса ANSYS Workbench. Индивидуальное задание включает в себя создание твердотельной модели трёхмерной детали, а также расчёт напряженно-деформированного состояния полученной детали под действием статических нагрузок с использованием возможностей ANSYS Workbench. Индивидуальное задание также предусматривает сравнение результатов, полученных на основании упругой и упругопластической моделей поведения материала. Кроме того, по результатам оценки НДС в различных постановках, необходимо произвести анализ прочности детали и выдать рекомендации по оптимальному нагружению механической системы.

Форма контроля – отчет по индивидуальному заданию.

Примерная тематика лабораторных заданий

Тема 2. Геометрическое моделирование. Математические модели компьютерной графики (2 ч.)

Построение элементарных геометрических объектов. Математическое задание простейших графических примитивов. Преобразование координат при повороте и переносе системы координат.

Тема 3. Методы геометрического моделирования в САПР (2 ч.)

Основы моделирования в SolidWorks. Задание простейших графических примитивов. Основные операции в SolidWorks при формировании графических в 1D, 2D и 3D форматах. Моделирование ансамблей и сборок.

Тема 4. Этапы компьютерного моделирования процессов механики (2 ч.)

Отличительные особенности в математических моделях описания поведения материалов. Возможности использования упругих нелинейных и упруго-пластических моделей материалов. Исследование влияния корректности построения конечно-элементной сетки на точность результатов. Задание граничных условий в перемещениях и напряжениях. Обработка результатов расчета.

Тема 5. Метод перемещений (4 ч.)

Проведение кинематического анализа стержневой конструкции и определение степени кинематической неопределимости. Формирование системы канонических уравнений, ее решение и определение внутренних силовых факторов в поперечных сечениях стержневой системы.

Тема 6. Вычислительная механика стержневых систем (6 ч.)

Разбиение стержневой системы на конечные элементы. Формирование матриц преобразования и матриц жесткости в локальных системах координат для каждого стержневого элемента. Формирование матриц жесткости в глобальных системах координат. Формирование матрицы жесткости для всей конструкции. Задание граничных условий. Решение систем линейных алгебраических уравнений и анализ напряженно-деформированного состояния стержневой системы.

Тема 7. Методы решения систем линейных алгебраических уравнений (2 ч.)

Алгоритмизация метода Гаусса для систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) и его использование для решения систем канонических уравнений

метода перемещений. Алгоритмизация некоторых итерационных методов решения СЛАУ: метод последовательных приближений, метод полной релаксации.

Тема 8. Динамические задачи стержневых систем (6 ч.)

Проведение структурного анализа динамической системы с несколькими степенями свободы. Математическая модель динамики системы с конечным числом степеней свободы. Решение задач по динамике стержневых систем: плоская и пространственная ферма, плоская и пространственная рама. Моделирование динамики стержневых систем при сейсмическом нагружении.

Тема 9. Проблема собственных значений. Методы решения (2 ч.)

Алгоритмизация некоторых методов численной оценки собственных значений матриц: метод Крылова, метод Данилевского. Применение методов к определению приближенных значений собственных частот колебаний стержневых систем.

Тема 10. Нелинейные задачи вычислительной механики стержневых систем (4 ч.)

Типы нелинейностей: физическая, геометрическая и нелинейность по граничным условиям. Решение задачи о большом прогибе балки приводящим к геометрической нелинейности. Формирование матрицы жесткости для учета геометрической нелинейности задачи.

Тема 11. Численные методы решения нелинейных алгебраических уравнений и их систем (2 ч.)

Алгоритмизация некоторых итерационных методов решения систем нелинейных алгебраических уравнений: метод простых итераций, метод Ньютона, метод Зейделя, метод Ньютона-Рафсона. Использование одного из методов к решению системы нелинейных алгебраических уравнений для геометрически нелинейного изгиба балки.

Тема 13. Введение в метод конечных элементов (2 ч.)

Базовые элементы моделирования и интерфейс пользователя программного комплекса ANSYS. Рабочие плоскости. Создание ключевых точек, линий, кривых. Основы твердотельного моделирования механических систем. Создание простых одно- и двумерных CAD моделей. Основы языка APDL. Базовые команды APDL. Пример построения эпюр балки коробчатого сечения при помощи интерфейса пользователя и APDL кода.

Тема 14. Одномерные конечные элементы (2 ч.)

Математическое описание одномерного конечного элемента при различных типах деформаций. Обобщенный стержневой конечный элемент и формирование его матрицы жесткости. Использование одномерных КЭ при расчете плоских и пространственных ферм и рам.

Тема 15. Плоские конечные элементы (4 ч.)

Создание поверхностей. Булевы операции с телами. Создание сложных геометрических форм. Основы создания КЭ сеток. Основы постпроцессинга. Пример расчёта детали на прочность в статической упругой постановке.

Базовые элементы моделирования и интерфейс пользователя ANSYS Workbench. Рабочие плоскости. Создание ключевых точек, линий, кривых. Основы твердотельного моделирования объектов на основании эскизов. Создание простых одно- и двумерных CAD моделей.

Тема 16 Конечные элементы высших порядков (4 ч.)

Создание твердотельных моделей сложных механических систем. Выбор корректных математических моделей поведения материалов и задание соответствующих физико-механических свойств. Различные варианты постановок задач (упругая, упругопластическая, вязкоупругая). Варианты граничных условий. Примеры решения задач в различных постановках и сравнение результатов решения при помощи программных комплексов ANSYS и SolidWorks. Полный анализ НДС механических систем. Прочностной анализ механических систем.

Тема 17. Трёхмерные конечные элементы (4 ч.)

Анализ НДС трёхмерных деталей с использованием упругопластических моделей поведения материала при помощи возможностей программных комплексов ANSYS и SolidWorks. Создание твердотельной модели трёхмерной детали, а также расчёт НДС полученной детали под действием статических нагрузок. Сравнительный анализ результатов в упругой и упругопластической постановке.

Тема 18. Метод конечных элементов в динамических задачах механики деформируемого твердого тела (6 ч.)

Способы задания граничных условий в динамических задачах при решении методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS. Дискретизация по времени и способы контроля решения на каждом временном шаге. Решение кинематических задач в программном комплексе ANSYS. Решение простейших нестационарных задач.

Тема 19. Типы задач компьютерной механики и методы их решения (22 ч.)

Основы теплофизики. Граничные условия в задачах теплофизики. Особенности решения задач теплофизики при помощи МКЭ. Пример решения задачи теплофизики для трёхмерной механической системы. Пример решения связанной задачи «механика-теплофизика». Примеры решения задач на собственные колебания, потерю устойчивости, контактных задач, задач кинематики и динамики. Модальный анализ и анализ потери устойчивости сложных механических систем.

Описание инновационных подходов и методов к преподаванию учебной дисциплины

При организации образовательного процесса используется **практико-ориентированный подход**, который предполагает:

– освоение содержания образования через решения практических задач;

- приобретение навыков эффективного выполнения разных видов профессиональной деятельности;
- использование процедур, способов оценивания, фиксирующих формирование профессиональных компетенций.

Методические рекомендации по организации самостоятельной работы обучающихся

1. Самостоятельная работа в процессе работы с литературой.

Просмотрите конспект сразу после занятий. Пометьте материал конспекта лекций, который вызывает затруднения для понимания.

Попытайтесь найти ответы на затруднительные вопросы, используя предлагаемую литературу.

Если самостоятельно не удалось разобраться в материале, сформулируйте вопросы и обратитесь на ближайшей лекции за помощью к преподавателю.

Каждую неделю рекомендуется отводить время для повторения пройденного материала, проверяя свои знания, умения и навыки по контрольным вопросам.

2. Самостоятельная работа по составлению конспекта.

1. Соберите литературу по теме. Изучите тот источник, где она изложена наиболее полно и на современном уровне.

2. По этому источнику составьте подробный план с указанием страниц книги, относящихся к определенному пункту плана.

3. Изучите другие источники. Если в них встречается материал по уже имеющемуся пункту плана, запишите в плане и новый источник с указанием страниц. Если же в другом источнике материал раскрывает тему с другой стороны, добавьте еще пункт плана.

4. Проанализировав всю литературу, собранную по теме, вы получите окончательный план, по которому можно писать конспект, объединяя по пунктам материал из разных источников.

5. Отредактируйте составленный вами конспект, внимательно прочтите его и подумайте: - удовлетворяет ли вас его общий план; - хорошо ли воспринимается смысловая, логическая связь между отдельными элементами содержания; - удачно ли использованы цитаты, правильно ли установлена связь между оборотами речи и фразами; - верно ли поставлены знаки препинания в цитатах.

3. Подготовка к лабораторным занятиям

Назначение лабораторных занятий - углубление и проработка теоретического материала предмета путем регулярной и планомерной самостоятельной работы студентов на протяжении всего курса. Непосредственное проведение лабораторного занятия предполагает: решение задач и упражнений по об-

разцу; проведение анализа результатов; систематизацию материала и подготовка отчета о проведенной работе.

Инструкция:

Изучите нормативные документы, обязательную и дополнительную литературу по рассматриваемому вопросу.

прочтите конспект лекции по теме.

Внимательно изучите порядок выполнения индивидуальной практической работы или алгоритм, представленный преподавателем.

4. Подготовка к зачету/экзамену

Внимательно прочитайте материал по конспекту, составленному на учебном занятии.

Прочитайте тот же материал по учебнику, учебному пособию.

Постарайтесь разобраться с непонятными, в частности новыми терминами. Часто незнание терминологии мешает студентам воспринимать материал на занятиях на должном уровне.

Ответьте на контрольные вопросы для самопроверки, имеющиеся в учебнике.

Кратко перескажите содержание изученного материала «своими словами».

Заучите «рабочие определения» основных понятий, законов.

Освоив теоретический материал, приступайте к выполнению заданий, упражнений; решению задач, расчетов по индивидуальным заданиям и т.д.

Примерный перечень вопросов к экзамену

1. Математическое описание обобщенного стержневого конечного элемента.
2. Матрица жесткости элемента и способы ее формирования.
3. Матрица преобразования и ее построение.
4. Способы задания эквивалентных узловых нагрузок по граничным условиям.
5. Способы формирования глобальной матрицы жесткости для всех конструкции.
6. Функции формы и их задание.
7. Математическая модель решения динамической задачи методом конечных элементов.
8. Дискретизация решения динамической задачи по времени и контроль решения на каждом из временных этапов.
9. Численные методы решения систем линейных алгебраических уравнений.
10. Численные методы оценки собственных значений матрицы.
11. Метод перемещений и его применение к решению задач для кинематических неопределимых стержневых систем.

12. Численные методы решения систем нелинейных алгебраических уравнений.
13. Математическое описание плоских трехузловых и четырехузловых конечных элементов.
14. Математическое описание пространственных конечных элементов.
15. Метод коллокаций и его численная реализация.
16. Сплайны (кубические сплайны и В-сплайны) и кривые Безье.
17. Математические модели простейших геометрических примитивов.
18. Модальный анализ стержневой системы.
19. Анализ устойчивости стержневой системы методом конечных элементов.
20. Понятие нелинейной задачи. Типы нелинейностей.

ПРОТОКОЛ СОГЛАСОВАНИЯ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ УВО

Название дисциплины, с которой требуется согласование	Название кафедры	Предложения об изменениях в содержании учебной программы по изучаемой учебной дисциплине	Решение, принятое кафедрой, разработавшей учебную программу (с указанием даты и номера протокола) ¹
Механика сплошной среды	Кафедра теоретической и прикладной механики	нет	Изменений в содержании учебной программы не требуется. Протокол № 10 от 19.05.2021.
Численные методы	Кафедра веб-технологий и компьютерного моделирования	нет	Изменений в содержании учебной программы не требуется. Протокол № 10 от 19.05.2021.

**ДОПОЛНЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ К УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЕ
ПО ИЗУЧАЕМОЙ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ**
на _____ / _____ учебный год

№№ ПП	Дополнения и изменения	Основание

Учебная программа пересмотрена и одобрена на заседании кафедры
(протокол № _____ от _____ 20_ г.)

Заведующий кафедрой

д-р физ.-мат. наук,

профессор

(степень, звание)

(подпись)

_____ М.А. Журавков _____

(И.О. Фамилия)

УТВЕРЖДАЮ

Декан факультета

д-р физ.-мат. наук,

доцент

(степень, звание)

(подпись)

_____ С.М. Босяков _____

(И.О. Фамилия)