

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе и
образовательным инновациям

О.Н. Здрок
«30» _____ 2020 г.

Регистрационный № УД- 9153 /уч.

**Аналитические методы расчета напряженно-деформированного
состояния машиностроительных конструкций**

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

1-31 80 04 Механика и математическое моделирование
Профилизация: Теоретическая и прикладная механика

2020 г.

Учебная программа составлена на основе ОСВО 1-31 80 04-2019 и учебного плана № G31-019/уч., утвержденного 11.04.2019.

СОСТАВИТЕЛЬ:

Щербаков Сергей Сергеевич – профессор кафедры теоретической и прикладной механики механико-математического факультета Белорусского государственного университета, доктор физико-математических наук, профессор.

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

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

Ю.В. Василевич, заведующий кафедрой «Теоретическая механика и механика материалов» Белорусского национального технического университета, доктор физико-математических наук, профессор.

РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:

Кафедрой теоретической и прикладной механики механико-математического факультета БГУ
(протокол № 11 от 16.06.2020)

Научно-методическим советом БГУ
(протокол № 5 от 17.06.2020)

Зав.кафедрой теоретической и прикладной механики _____

_____ М.А.Журавков

Пояснительная записка

Цели и задачи учебной дисциплины

Цель учебной дисциплины – ознакомить магистрантов с возможностями аналитических методов и их особенностями для расчета напряженно-деформированного состояния сложных машиностроительных конструкций.

Задачи учебной дисциплины:

- ознакомление магистрантов с подходами к определению напряженно-деформированного состояния в контактных задачах в окрестности пятна взаимодействия двух твердых тел;
- ознакомление магистрантов с возможностями использования интегральных преобразований и рядов Фурье к теории упругости и термоупругости;
- формирование навыков практического решения задач механики с использованием подходов основанных на аналитических преобразованиях.

Место учебной дисциплины в системе подготовки специалиста с высшим образованием (магистра).

Дисциплина «Аналитические методы расчета напряженно-деформированного состояния машиностроительных конструкций» посвящена изучению широко распространенных в современной механике подходов к определению точных решений для описания напряженно-деформированного состояния твердых тел.

Учебная дисциплина входит в модуль «Специальные разделы механики сплошных сред» – 1 компонента учреждения высшего образования. Рассматриваются конкретные приложения и примеры решения задач механики конструкций, теории упругости и термоупругости с использованием аналитических преобразований.

Требования к компетенциям

Освоение учебной дисциплины «Аналитические методы расчета напряженно-деформированного состояния машиностроительных конструкций» должно обеспечить формирование следующей **специализированной компетенции:**

СК-2. Быть способным использовать аналитические, приближенные и численные методы к решению специальных задач биомеханики, геомеханики, механики сплошных сред, для расчета напряженно-деформированного состояния машиностроительных конструкций.

В результате изучения дисциплины «Аналитические методы расчета напряженно-деформированного состояния машиностроительных конструкций» магистрант должен:

знать:

– постановку начальной и граничных задач механики деформируемого твердого тела;

– методы решения задач с использованием аналитических подходов к определению тензоров напряжений, деформаций и вектора перемещений;

уметь:

– составлять математическую модель для описания напряженно-деформированного состояния твердого тела и системы твердых тел;

– составлять систему разрешающих уравнений;

– применять аналитические методы для нахождения точных решений по определению компонент тензора напряжений и деформаций;

владеть:

– подходами к реализации аналитических методов в механике деформируемого твердого тела.

Структура учебной дисциплины

Дисциплина изучается во 2 семестре. Всего на изучение учебной дисциплины «Аналитические методы расчета напряженно-деформированного состояния машиностроительных конструкций» отведено:

- для очной формы получения высшего образования – 216 часов, в том числе 72 аудиторных часа, из них: лекций – 36 часов, лабораторных занятий – 36 часов.

Трудоемкость учебной дисциплины составляет 6 зачетных единиц.

Форма текущей аттестации по учебной дисциплине – зачёт.

СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

Тема 1. Основные формы деформирования стержневых систем и их аналитическое описание.

Стержневая система. Растяжение/сжатие стержня. Кручение стержня произвольного поперечного сечения. Плоский изгиб балки. Расчет статически определимой пространственной стержневой системы.

Тема 2. Методы расчета статически неопределимых стержневых систем.

Понятие статической неопределимости. Степень статической неопределимости. Метод сил. Метод перемещений. Системы канонических уравнений. Итоговые эпюры внутренних усилий. Способы проверки условий равновесия.

Тема 3. Напряженно-деформированное состояние упругого полупространства под действием сосредоточенных сил.

Потенциалы Буссинеска и Черрути. Условия равновесия. Сосредоточенная нормальная сила (задача Буссинеска). Равномерная и неравномерная нагрузка распределенная по подобластям (прямоугольник, круг, эллипс). Сосредоточенная касательная сила (задача Черрути). Осесимметричное распределение касательных усилий. Кручение.

Тема 4. Нормальный контакт упругих тел: задача Герца.

Геометрические соотношения для контактирующих гладких поверхностей несогласованной формы. Теория упругого контакта Герца: условия равновесия и система разрешающих уравнений. Упругий контакт тел вращения. Контакт цилиндрических тел в условиях плоской задачи. Модели упругого основания. Вдавливание жесткого индентора в упругое основание Винклера. Вдавливание жесткого индентора в упругое двухпараметрическое основание Пастернака.

Тема 5. Задачи определения напряженно-деформированного состояния цилиндрического тела при комплексном нагружении.

Упрощенная теория расчета толстого бесконечно длинного кругового цилиндра при внутреннем и внешнем давлении. Расчет толстого бесконечно длинного кругового цилиндра при учете температурного нагрева стенок. Контактная задача для предварительно напряженного конечного цилиндра. Взаимодействие бандажа с цилиндром конечных размеров. Взаимодействие бандажа с предварительно напряженным цилиндром конечных размеров.

Тема 6. Преобразование Лапласа и его применение к задачам термоупругости.

Определения преобразования Лапласа и его основные свойства. Образы по Лапласу для некоторых основных функций. Уравнение теплопроводности. Начальное и граничные условия. Уравнение нестационарной теплопроводности пластин. Исследование нестационарных температурных полей плоских тел (полупространства, неограниченной пластины, диска).

Тема 7. Ряды Фурье и их применение при расчете конструкций на изгиб.

Определения ряда Фурье. Четные и нечетные функции. Определение комплексного ряда Фурье. Отношения между рядами Фурье и комплексными рядами Фурье. Операции над рядами Фурье. Равенство Парсеваля. Применение рядов Фурье в плоской задаче теории упругости. Применение рядов Фурье к расчету тонких пластин на изгиб.

Тема 8. Преобразование Фурье и его применение к исследованию напряженно-деформированного состояния твердых тел.

Определения преобразования Фурье и его основные свойства. Образы по Фурье для некоторых основных функций. Применение преобразования Фурье к решению первой и второй основных задач теории упругости для бесконечной полосы. Применение преобразования Фурье к задачам изгиба тонких плит.

Тема 9. Метод аналитического граничного элемента.

Граничный элемент с распределенной нагрузкой. Интегрирование фундаментальных решений для произвольно распределенной нормальной и касательной нагрузки по граничному элементу. Частные решения для равномерно, линейно и полиномиально распределенных нагрузок. Условия сопряжения на концах смежных граничных элементов. Непрямой метод граничных элементов. Применение метода аналитического граничного элемента к расчету напряженного состояния плоских тел конечного размера.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Дневная форма получения образования

Номер темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов				Количество часов УСР	Форма контроля знаний
		Лекции	Практич. занятия	Лабораторные занятия	иное		
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Основные формы деформирования стержневых систем и их аналитическое описание	4		4			Устный опрос. Отчет по лабораторной работе. Проверка индивидуальных заданий.
2	Методы расчета статически неопределимых стержневых систем	4		4			Устный опрос. Отчет по лабораторной работе. Проверка индивидуальных заданий.
3	Напряженно-деформированное состояние упругого полупространства под действием сосредоточенных сил	4		4			Устный опрос. Отчеты по

							лабораторным работам. Проверка индивидуальных заданий.
4	Нормальный контакт упругих тел: задача Герца	4		4			Устный опрос. Отчеты по лабораторным работам. Проверка индивидуальных заданий.
5	Задачи определения напряженно-деформированного состояния цилиндрического тела при комплексном нагружении	4		4			Устный опрос. Отчеты по лабораторным работам. Проверка индивидуальных заданий
6	Преобразование Лапласа и его применение к задачам термоупругости	4		4			Устный опрос. Отчеты по лабораторным работам. Проверка индивидуальных заданий
7	Ряды Фурье и их применение при расчете конструкций на	4		4			Устный опрос.

	изгиб						Отчеты по лабораторным работам. Проверка индивидуальных заданий
8	Преобразование Фурье и его применение к исследованию напряженно-деформированного состояния твердых тел	4		4			Устный опрос. Отчеты по лабораторным работам. Проверка индивидуальных заданий
9	Метод аналитического граничного элемента	4		4			Устный опрос. Отчеты по лабораторным работам. Проверка индивидуальных заданий.
	Итого	36		36			

ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Перечень основной литературы:

1. Hetnarski R.B., Estami M.R. Thermal stresses – advanced theory and applications. Springer, 2019. – 636 p.
2. Serov V. Fourier series, Fourier transform and their applications to Mathematical physics. Springer, 2017. – 519 p.
3. Srivastava H.M. Integral transformations, operational calculus and their applications. Mdpi AG, 2020. – 220 p.
4. Коваленко А.Д. Основы термоупругости. – Киев, Наукова думка, 1970. – 309 с.
5. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. – М.: Наука, 1988. – 712 с.
6. Уфлянд Я.С. Интегральные преобразования в задачах теории упругости. – 2-е изд., доп. – М.: Наука, 1968. – 402 с.
7. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: учебник для вузов. – 10-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2000. – 592 с.

Перечень дополнительной литературы:

1. Brown J.W., Churchill R.V. Fourier series and boundary value problems. – 8-th ed. – McGraw-Hill Education, 2011. – 416 p.
2. Movchan A.B., Movchan N.V. Mathematical modeling of solids with nonregular boundaries. CRC-Press, 2020. – 352 p.
3. Александров В.М., Чебаков М.И. Аналитические методы в контактных задачах теории упругости. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 304 с.
4. Мусхелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1966. – 709 с.

Перечень рекомендуемых средств диагностики и методика формирования итоговой оценки

Текущий контроль усвоения знаний (теоретическая часть курса) рекомендуется осуществлять в виде: устного опроса, отчета по индивидуальным заданиям их проверкой с устной защитой.

Для закрепления и проверки знаний и умений магистрантов (практическая часть курса) рекомендуется выполнение лабораторных работ с объяснением

новых вводимых понятий, а также устного опроса студентов, контроля отчетов по лабораторным работам.

Формой текущей аттестации по дисциплине «Аналитические методы расчета напряженно-деформированного состояния машиностроительных конструкций» учебным планом предусмотрен зачёт.

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:

- устный опрос – 30%; нет в карте
- отчет по лабораторным работам – 40%;
- выполнение индивидуальных заданий – 30%.

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

Примерная тематика лабораторных занятий

Лабораторная работа № 1. Определение напряженного состояния пространственной статически определимой стержневой конструкции.

Лабораторная работа № 2. Расчет статически неопределимой рамы методом сил.

Лабораторная работа № 3. Расчет статически неопределимой рамы методом перемещений.

Лабораторная работа № 4. Расчет напряженно-деформированного состояния упругого полупространства при действии нормальной и касательной распределенной нагрузки.

Лабораторная работа № 5. Определение геометрии площадки контакта при контактном взаимодействии двух тел вращения.

Лабораторная работа № 6. Определение напряженно-деформированного состояния стенки толстого цилиндрического тела в температурном поле и наличии давления.

Лабораторная работа № 7. Использование преобразования Лапласа для решения начально-граничной задачи для прямоугольной пластины в температурном поле.

Лабораторная работа № 8. Применение рядов Фурье к расчету тонкой круговой пластины на изгиб.

Лабораторная работа № 9. Применение преобразования Фурье к решению граничных задач для упругой бесконечной полосы.

Лабораторная работа № 10. Исследование напряженного состояния упругой полуплоскости под действием нормальной и касательной нагрузок методом аналитического граничного элемента.

Описание инновационных подходов и методов к преподаванию учебной дисциплины

При организации образовательного процесса используется *эвристический подход*, который предполагает демонстрацию многообразия решений большинства профессиональных задач и жизненных проблем.

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;
- ориентацию на генерирование идей, реализацию групповых студенческих проектов, развитие предпринимательской культуры;
- использованию процедур, способов оценивания, фиксирующих сформированность профессиональных компетенций.

При организации образовательного процесса *используются методы и приемы развития критического мышления*, которые представляют собой систему, формирующую навыки работы с информацией в процессе чтения и письма; понимания информации как отправного, а не конечного пункта критического мышления.

Методические рекомендации по организации самостоятельной работы обучающихся

При изучении учебной дисциплины следующие формы самостоятельной работы:

- поиск (подбор) и обзор литературы и электронных источников по индивидуально заданной проблеме дисциплины;
- изучение материала, вынесенного на самостоятельную проработку;
- подготовка к лекциям и лабораторным занятиям;
- работы, предусматривающие подготовку: отчетов по индивидуальным работам с устной защитой и защиты научно-исследовательских эссе.

Тем самым, имеется в виду постепенное превращение обучения в самообучение, когда магистрант должен получать знания главным образом за счет креативной самостоятельной работы, самостоятельно осуществляя поиск

необходимой информации и созидательно прорабатывая ее с тем, чтобы выполнить необходимые умозаключения и получить результаты.

В этом случае, выполняя учебные задачи, магистранты самостоятельно приобретают новые знания, навыки и умения (в частности, умение анализировать и принимать решения в нестандартных ситуациях), что очень важно для эффективной будущей самостоятельной профессиональной деятельности.

Примерный перечень вопросов к зачету

1. Плоский изгиб балки прямоугольного поперечного сечения.
2. Кручение бруса произвольного поперечного сечения. Упрощение теории для бруса с поперечным сечением в виде круга и кольца.
3. Метод сил для раскрытия статической неопределимости. Пример.
4. Метод перемещений для раскрытия статической неопределимости. Пример.
5. Граничные задачи для полупространства. Условия равновесия. Фундаментальные решения.
6. Задача Герца: определение параметров площадки контакта.
7. Задача Герца: определение напряженно-деформированного состояния в окрестности контактного взаимодействия.
8. Упрощенная теория расчета толстого бесконечно длинного кругового цилиндра при внутреннем и внешнем давлении.
9. Термоупругий расчет толстого бесконечно длинного кругового цилиндра.
10. Контактная задача для взаимодействия бандажа и цилиндра.
11. Определения преобразования Лапласа и его основные свойства. Образы по Лапласу для некоторых основных функций.
12. Исследование нестационарных температурных полей плоских тел (полупространства, неограниченной пластины, диска) с использованием преобразования Лапласа.
13. Ряд Фурье и комплексный ряд Фурье. Операции над рядами Фурье. Равенство Парсеваля.
14. Применение рядов Фурье в плоской задаче теории упругости.
15. Применение рядов Фурье к расчету тонких пластин на изгиб.
16. Преобразование Фурье и его основные свойства. Образы по Фурье для некоторых основных функций.
17. Решение граничных задач теории упругости для бесконечной полосы с применением преобразования Фурье.
18. Применение преобразования Фурье к задачам изгиба тонких плит.

19. Определение аналитического граничного элемента. Интегрирование фундаментальных решений для произвольно распределенной нормальной и касательной нагрузки по граничному элементу.

20. Непрямой метод граничных элементов.

21. Применение метода аналитического граничного элемента к расчету напряженного состояния плоских тел конечного размера.

ПРОТОКОЛ СОГЛАСОВАНИЯ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ УВО

Название учебной дисциплины, с которой требуется согласование	Название кафедры	Предложения об изменениях в содержании учебной программы учреждения высшего образования по учебной дисциплине	Решение, принятое кафедрой, разработавшей учебную программу (с указанием даты и номера протокола)
Современные численные методы и пакеты прикладных программ в механике	Кафедра теоретической и прикладной механики	нет	Изменений не требуется (протокол № 11 от 16.06.2020)

ДОПОЛНЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ К УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЕ УВО
на ____ / ____ учебный год

№п/ п	Дополнения и изменения	Основание

Учебная программа пересмотрена и одобрена на заседании кафедры теоретической и прикладной механики (протокол № ____ от _____ 202_ г.)

Заведующий кафедрой
д. физ.-мат. наук, профессор

М.А. Журавков

УТВЕРЖДАЮ
Декан факультета
д. физ.-мат. наук, доцент

С.М. Босяков