

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Амурский государственный университет»



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной и научной
работе

А.В. Лейфа

« 14 сентября » 2021г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

Инженерный анализ методом конечных элементов

Направление подготовки: 24.03.01 «Ракетные комплексы и космонавтика»
Направленность (профиль) образовательной программы: Ракетно-космическая техника
Квалификация выпускника: бакалавр
Год набора: 2021
Форма обучения: очная
Курс 3 семестр 6
Зачет 6 семестр
Общая трудоемкость дисциплины 72 (акад. час.), 2 з.е.

Составитель: Соловьев В.В, доцент, канд. техн. наук

Факультет инженерно-физический

Кафедра стартовые и технические ракетные комплексы

2021 г.

Рабочая программа составлена на основании Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования для направления подготовки 24.03.01 «Ракетные комплексы и космонавтика», утвержденного приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 5 февраля 2018 года №71

Рабочая программа обсуждена на заседании кафедры Стартовые и технические ракетные комплексы

« 01 » _____ сентября _____ 2021 г., протокол № 1

Зам. заведующего кафедрой _____  В.В. Соловьев

СОГЛАСОВАНО
Учебно-методическое управление

 Н.А. Чалкина

« 1 » _____ сентября _____ 2021 г.

СОГЛАСОВАНО
Выпускающая кафедра

_____  В.В. Соловьев

« 1 » _____ сентября _____ 2021 г.

СОГЛАСОВАНО
Директор научной библиотеки

 О.В. Петрович

« 1 » _____ сентября _____ 2021 г.

СОГЛАСОВАНО
Центр информационных и образовательных технологий

_____  А.А. Тодосейсук

« 1 » _____ сентября _____ 2021 г.

1 ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Цель дисциплины – изучение метода конечных элементов как математического аппарата, используемого для численной реализации математических моделей естественнонаучных явлений, а также овладение навыками использования современных пакетов прикладных программ, позволяющих решать задачи механики сплошных сред на основе МКЭ.

Задачи дисциплины включают: освоение базиса МКЭ, общей концепции метода взвешенных невязок, метода Галеркина; изучение особенностей построения конечно-элементных решений для стационарных и нестационарных задач; изучение методов оценки погрешности МКЭ; изучение классификации простейших математических моделей жидких, твердых и газообразных сред и моделирование различных протекающих явлений и процессов; освоение алгоритмов и приемов программной реализации для решения практических задач; решение задач с использованием ППП COMSOL MULTIPHYSICS.

2 МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОП ВО

Для освоения дисциплины студенты используют знания, умения и виды деятельности, сформированные в процессе обучения в вузе в предшествующих семестрах. Этот курс тесно связан с основными математическими и информационными дисциплинами, изученными ранее: линейная алгебра, математический анализ, дифференциальные уравнения, теоретическая механика, численные методы и методы оптимизации, информатика. Освоение дисциплины потенциально полезно для прохождения преддипломной практики, написания выпускной квалификационной работы.

3 КОМПЕТЕНЦИИ ОБУЧАЮЩЕГОСЯ, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ И ИНДИКАТОРЫ ИХ ДОСТИЖЕНИЯ

3.1 Общепрофессиональные компетенции и индикаторы их достижения

Категория общепрофессиональной компетенции	Код и наименование общепрофессиональной компетенции	Код и наименование индикатора достижения общепрофессиональной компетенции
Владение информационными технологиями	ОПК-2. Способен использовать современные информационные технологии для решения типовых задач по проектированию, конструированию, производству, испытанию и эксплуатации объектов профессиональной деятельности	ИД – 1 опк-2 Знать: - современные информационные технологии для решения типовых задач профессиональной деятельности. ИД – 2 опк-2 Уметь: - применять современные информационные технологии для решения типовых задач профессиональной деятельности. ИД – 3 опк-2 Владеть: - навыками использования информационных технологий для решения типовых задач профессиональных деятельности.

3.2 Профессиональные компетенции и индикаторы их достижения

Код и наименование профессиональной компетенции	Код и наименование индикатора достижения профессиональной компетенции
ПК-2 Способен подготавливать предложения и проводить работу по освоению и внедрению технологических процессов, новых материалов и программных продуктов технологического назначения	ИД-1 _{ПК-2} Знать: - преимущества использования технологических процессов, новых материалов и программных продуктов технологического назначения. ИД-2 _{ПК-2} Уметь: - разрабатывать программные приложения новых технологических процессов и материалов ИД-3 _{ПК-2} Владеть: - практическим опытом проведения НИР и ОТР по освоению и внедрению новых технологических процессов материалов и программных продуктов

4 СТРУКТУРА ДИСЦИПЛИНЫ

Общая трудоемкость дисциплины составляет 2 зачетные единицы, 72 акад. часа.

№ п/п	Раздел дисциплины	Семестр	Виды контактной работы и трудоемкость (в академических часах)			Самостоятельная работа (академических часах)	Форма текущего контроля успеваемости
			Л	ПЗ	КТО		
1	Введение в метод конечных элементов и численное моделирование	6	2	2		4	Устный опрос по теме практической работы «Решение прикладных задач в постановке уравнений с частными производными в PDE toolbox ППП Matlab» (стационарные задачи).
2	Основы МКЭ. Базисные функции. Основные положения метода взвешенных невязок.	6	2	2		4	Устный опрос по теме практической работы «Решение прикладных задач в постановке уравнений с частными производными в PDE toolbox ППП Matlab (нестационарные задачи)».
3	Конечно-элементный метод Галеркина для реализации моделей в постановке краевых задач для обыкновенных дифференциальных уравнений	6	2	2		5,8	Устный опрос по теме практической работы «Решение краевых задач в постановке обыкновенных дифференциальных уравнений МКЭ».

№ п/п	Раздел дисциплины	Семестр	Виды контактной работы и трудоемкость (в академических часах)			Самостоятельная работа (академических часах)	Форма текущего контроля успеваемости
			Л	ПЗ	КТО		
4	МКЭ для решения стационарных задач математической физики	6	4	2		8	Устный опрос по теме практической работы «Решение краевых задач для уравнения Пуассона МКЭ».
5	МКЭ для решения нестационарных задач математической физики	6	4	4		8	Устный опрос по теме практической работы «Решение краевых задач для уравнения Пуассона МКЭ».
6	Обзор современного специализированного программного обеспечения для КЭ моделирования систем. Возможности системы моделирования COMSOL MULTIPHYSICS.	6	4	4		8	Устный опрос по теме практической работы «Использование ППП COMSOL MULTIPHYSICS для моделирования физических систем»
7	Зачет	6			0,2		
	Итого		18	16	0,2	37,8	

Л-лекции, ПЗ- практические занятия, КТО – контроль теоретического обучения

5. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

5.1 Лекции

№	Наименование темы	Содержание темы
1	Введение в метод конечных элементов и численное моделирование	История развития, опыт и перспективы применения метода конечных элементов, задачи численного моделирования. Общие принципы построения математических моделей. Классификация моделей. Численное моделирование задач механики сплошных сред. Методология математического моделирования и МКЭ. МКЭ как математический аппарат реализации моделей сложных систем.
2	Основы МКЭ. Базисные функции. Основные положения метода взвешенных невязок.	Общая структура алгоритма МКЭ. Система базисных и весовых функций. Кусочно-постоянные базисные функции, кусочно-линейные непрерывные базисные функции. Линейно независимая система базисных функций, функции формы. Улучшение аппроксимации. Интерполяция, синус-ряды Фурье. Аппроксимация с помощью метода взвешенных невязок. Невязка, минимизация невязки. Весовые функции и методы взвешенных невязок: метод поточечной коллокации, коллокация по подобластям, метод Галеркина, метод наименьших квадратов.

№	Наименование темы	Содержание темы
3	Конечно-элементный метод Галеркина для реализации моделей в постановке краевых задач для обыкновенных дифференциальных уравнений	Конечно-элементная аппроксимация решений дифференциальных уравнений и требование гладкости. Слабая формулировка метода Галеркина. Формирование локальной и глобальной матриц жесткости. Методология ансамблирования элементов. Основные этапы решения задач с помощью МКЭ. Решение одномерной краевой задачи теплопроводности с граничными условиями первого рода. Основные этапы решения, применение процедуры ансамблирования. Решение краевой задачи теплопроводности с граничными условиями второго рода. Пример модельной задачи теории упругости.
4	МКЭ для решения стационарных задач математической физики	Обобщение метода конечных элементов на двумерные и трехмерные задачи. Двумерные и трехмерные конечные элементы линейного типа. Принципы разбиения плоских областей на конечные элементы. Ленточные матрицы жесткости. Формирование многомерных базисных функций, ансамблирование и построение глобальных СЛАУ. Случай граничных условий, содержащих производные. Метод конечных элементов в многомерных стационарных задачах математической физики. Моделирование двумерных задач теплопроводности треугольными и прямоугольными конечными элементами. Метод конечных элементов для решения двумерной модельной задачи теории упругости в напряжениях с использованием треугольных конечных элементов.
5	МКЭ для решения нестационарных задач математической физики	Метод конечных элементов в многомерных нестационарных задачах математической физики. Особенности дискретизации задачи по времени. Погрешность конечно-элементного решения задач для обыкновенных дифференциальных уравнений. Погрешность конечно-элементного решения задач для уравнений с частными производными.
6	Обзор современного специализированного программного обеспечения для КЭ моделирования систем. Возможности системы моделирования COMSOL MULTIPHYSICS.	Конечно-элементные системы научных и инженерных расчетов. Современные FEA системы: NASTRAN, ANSYS, COMSOL, FLEX PDE, DPE tool MATLAB. Сравнительная характеристика систем.

5.2 Практические занятия

№	Наименование темы	Содержание темы(раздела)
1	Решение прикладных задач в постановке уравнений с частными производными	Решение задач в PDE toolbox ППП Matlab (стационарные задачи)
2	Решение прикладных задач в постановке уравнений с частными производными	Решение задач в PDE toolbox ППП Matlab (нестационарные задачи)
3	Решение краевых задач в постановке обыкновенных дифференциальных уравнений МКЭ	Изучение решений краевых задач
4	Решение краевых задач для уравнения Пуассона МКЭ	Изучение решений краевых задач
5	Использование ППП COMSOL MULTIPHYSICS для моделирования физических систем	Изучение ППП COMSOL MULTIPHYSICS

При выполнении практических работ по данному курсу студенты должны продемонстрировать умение решать прикладные задачи, как с использованием возможностей матема-

тических прикладных программ (ППП Matlab, ППП COMSOL MULTIPHYSICS), так и реализуя алгоритмы изученных методов.

Практические работы выполняются строго в соответствии с выданным преподавателем заданием и вариантом. Завершающим этапом выполнения работы является оформление отчета. Отчет оформляется каждым студентом в отдельной тетради. Отчет содержит: лист задания, раздел, содержащий теоретические основы соответствующего раздела курса, включая расчетные формулы основного метода и расчет погрешности метода, раздел, содержащий описание программной реализации: листинг программного блока, раздел, содержащий описание результатов, полученных с использованием возможностей ППП Matlab или ППП COMSOL MULTIPHYSICS.

6 САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА

Самостоятельная работа – 37,8 акад. час. По данному курсу в рамках самостоятельной работы студента предполагается подготовка к устной защите практических работ.

№ п/п	№ раздела (темы) дисциплины	Форма (вид) самостоятельной работы	Трудоёмкость в акад. часах
1	1	Самостоятельная работа по теме практической работы «Решение прикладных задач в постановке уравнений с частными производными в PDE toolbox ППП Matlab (стационарные задачи)»	4
2	2	Самостоятельная работа по теме практической работы «Решение прикладных задач в постановке уравнений с частными производными в PDE toolbox ППП Matlab (нестационарные задачи)»	4
3	3	Самостоятельная работа по теме практической работы «Решение краевых задач в постановке обыкновенных дифференциальных уравнений МКЭ»	8
4	4-5	Самостоятельная работа по теме практической работы «Решение краевых задач для уравнения Пуассона МКЭ»	13,8
5	6	Самостоятельная работа по теме практической работы «Использование ППП COMSOL MULTIPHYSICS для решения прикладных задач МКЭ»	8

7 ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Интегральная модель образовательного процесса по дисциплине формируют технологии методологического уровня: технология поэтапного формирования умственных действий, технология развивающего обучения, элементы технологии развития критического мышления, самоуправление. На занятиях используются методы активного обучения, как «Проблемная лекция». Перед изучением модуля обозначается проблема, на решение которой будет направлен весь последующий материал модуля. При чтении лекции используются мультимедийные презентации. При выполнении практических работ используется прием интерактивного обучения «Кейс-метод»: студентам выдается задание для подготовки к выполнению работы; с преподавателем обсуждается цель работы и ход её выполнения; цель анализируется с разных точек зрения, выдвигаются гипотезы, делаются выводы, анализируются полученные результаты.

Рекомендуется использование информационных технологий при организации коммуникаций со студентами для предоставления информации, выдача рекомендаций и консультирования по оперативным вопросам (электронная почта).

8. ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВА ДЛЯ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

Примерные вопросы к зачету:

1. Общие принципы построения математических моделей. Классификация моделей. Численное моделирование задач механики сплошных сред.
2. Методология математического моделирования и МКЭ. МКЭ как математический аппарат реализации моделей сложных систем.
3. Общая структура алгоритма МКЭ. Система базисных и весовых функций. Кусочно-постоянные базисные функции, кусочно-линейные непрерывные базисные функции. Линейно независимая система базисных функций, функции формы.
4. Аппроксимация с помощью метода взвешенных невязок. Весовые функции и методы взвешенных невязок: метод поточечной коллокации, коллокация по подобластям, метод Галеркина, метод наименьших квадратов.
5. Конечно-элементная аппроксимация решений дифференциальных уравнений и требование гладкости. Слабая формулировка метода Галеркина. Основные этапы решения задач с помощью МКЭ на примере решения одномерной краевой задачи теплопроводности с граничными условиями первого рода.
6. Обобщение метода конечных элементов на двумерные и трехмерные задачи. Двумерные и трехмерные конечные элементы линейного типа. Принципы разбиения плоских областей на конечные элементы. Ленточные матрицы жесткости. Формирование многомерных базисных функций, ансамблирование и построение глобальных СЛАУ.
7. Случай граничных условий, содержащих производные. Метод конечных элементов в многомерных стационарных задачах математической физики. Моделирование двумерных задач теплопроводности треугольными и прямоугольными конечными элементами.
8. Метод конечных элементов для решения двумерной модельной задачи теории упругости в напряжениях с использованием треугольных конечных элементов.
9. Метод конечных элементов в многомерных нестационарных задачах математической физики. Особенности дискретизации задачи по времени.
10. Погрешность конечно-элементного решения задач для обыкновенных дифференциальных уравнений. Погрешность конечно-элементного решения задач для уравнений с частными производными.
11. Конечно-элементные системы научных и инженерных расчетов. Современные FEA системы. Сравнительная характеристика систем.

9. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

а) литература

1. Солдаткин, А. В. Введение в метод конечных элементов : учебное пособие / А. В. Солдаткин, Е. С. Баранова. — Санкт-Петербург : БГТУ "Военмех" им. Д.Ф. Устинова, 2020. — 123 с. — ISBN 978-5-907324-05-3. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/172238>
2. Волков, Е. А. Численные методы : учебное пособие для вузов / Е. А. Волков. — 6-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 252 с. — ISBN 978-5-8114-7899-6. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/167179> (дата обращения: 25.05.2021). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
3. Присекин В.Л. Основы метода конечных элементов в механике деформируемых тел [Электронный ресурс]: учебник/ Присекин В.Л., Расторгуев Г.И.— Электрон. текстовые данные.— Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2010.— 238 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/45417>
4. Каледин, В. О. Методы конечных и граничных элементов : учебное пособие / В. О. Каледин. — Новокузнецк : НФИ КемГУ, 2017. — 102 с. — ISBN 978-5-8353-1971-8. —

б) Программное обеспечение и Интернет-ресурсы

№	Наименование ресурса	Краткая характеристика
1	http://www.iprbookshop.ru/	Электронно-библиотечная система IPRbooks – научно-образовательный ресурс для решения задач обучения в России и за рубежом. Уникальная платформа ЭБС IPRbooks объединяет новейшие информационные технологии и учебную лицензионную литературу. Контент ЭБС IPRbooks отвечает требованиям стандартов высшей школы, СПО, дополнительного и дистанционного образования. ЭБС IPRbooks в полном объеме соответствует требованиям законодательства РФ в сфере образования
2	http://repo.ssau.ru	Репозиторий (электронный научный архив) создан для длительного хранения, накопления и обеспечения долговременного и надежного открытого доступа к результатам научных исследований университета. Используя репозиторий Самарского университета (до 2016 года – Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королева (национальный исследовательский университет) (СГАУ) и Самарский государственный университет (СамГУ)), можно получить доступ к монографиям, авторефератам, диссертациям, выпускным квалификационным работам, научным статьям, нормативным документам, справочным, учебным и методическим пособиям, аудио и видеоконтенту. В электронном каталоге репозитория размещены работы по техническим научным направлениям, связанным с аэрокосмической техникой, материалами и технологиями; двигателестроением, динамикой и виброакустикой машин; информатикой и фотоникой; фундаментальными исследованиями для перспективных технологий. Гуманитарные исследования представлены работами в области лингвистики, литературоведения, истории, охраны окружающей среды, математики, химии, физики и других науках. Возможен полнотекстовый поиск по автору, заглавию, дате публикации, предмету, типу документа, а также просмотр публикаций по структурным подразделениям университета.
3	http://www.e.lanbook.com	Электронная библиотечная система «Издательства Лань», тематические пакеты: математика, физика, инженерно-технические науки, химия
4	Операционная система MS Windows 10 Education	Операционная система MS Windows 10 Education - DreamSpark Premium Electronic Software Delivery (3 years) Renewal по договору - Сублицензионный договор № Tr000074357/КНВ 17 от 01 марта 2016 г.
5	7-Zip	Программа-архиватор, бесплатное распространение по лицензии GNU LGPL http://www.7-zip.org/license.txt
6	LibreOffice	Пакет прикладных программ, бесплатное распространение по лицензии MozillaPublicLicenseVersion 2.0 http://www.libreoffice.org/download/license/

№	Наименование ресурса	Краткая характеристика
7	Comsol Multiphysics	Лицензия на учебный класс по сублицензионному договору №20/15/230 т 16.12.2015
8	MATLAB+SIMULINK	Academic classroom 25 по договору №2013.199430/949 от 20.11.2013

в) профессиональные базы данных и информационные справочные системы

№	Наименование	Описание
1	https://minobrnauki.gov.ru/	Министерств науки и высшего образования Российской Федерации
2	http://window.edu.ru	Единое окно доступа к образовательным ресурсам
3	http://www.ict.edu.ru/about	Информационно-коммуникационные технологии в образовании - федеральный образовательный портал.
4	http://www.multitran.ru/	Мультитран. Информационная справочная система «Электронные словари»
5	https://scholar.google.ru/	Google Scholar —поисковая система по полным текстам научных публикаций всех форматов и дисциплин.
6	http://www.gks.ru/	Федеральная служба государственной статистики: Официальный сайт с базами данных

10 МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Лекции проводятся в стандартной аудитории, оснащенной в соответствии с требованиями преподавания теоретических дисциплин, включая мультимедиа-проектор.

Практические занятия проводятся в компьютерном классе, в котором установлены и применяются пакеты прикладных программ Matlab и COMSOL MULTIPHYSICS.

Данное оборудование и программное обеспечение применяется при изучении дисциплины.

Самостоятельная работа обучающихся осуществляется в помещениях, оснащенных компьютерной техникой с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду университета.