

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Направление подготовки/специальность: 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Наименование образовательной программы: Автономные энергетические системы. Водородная и электрохимическая энергетика

Уровень образования: высшее образование - магистратура

Форма обучения: Очная

Рабочая программа дисциплины
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Блок:	Блок 1 «Дисциплины (модули)»
Часть образовательной программы:	Часть, формируемая участниками образовательных отношений
№ дисциплины по учебному плану:	Б1.Ч.10
Трудоемкость в зачетных единицах:	1 семестр - 3;
Часов (всего) по учебному плану:	108 часов
Лекции	1 семестр - 16 часов;
Практические занятия	1 семестр - 32 часа;
Лабораторные работы	не предусмотрено учебным планом
Консультации	проводится в рамках часов аудиторных занятий
Самостоятельная работа	1 семестр - 59,7 часа;
в том числе на КП/КР	не предусмотрено учебным планом
Иная контактная работа	проводится в рамках часов аудиторных занятий
включая:	
Контрольная работа	
Промежуточная аттестация:	
Зачет с оценкой	1 семестр - 0,3 часа;

Москва 2021

ПРОГРАММУ СОСТАВИЛ:

Преподаватель

(должность)

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Елисеев А.Г.
	Идентификатор	R1d31b868-YeliseevAG-013824c4

(подпись)

А.Г. Елисеев

(расшифровка
подписи)

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель
образовательной программы

(должность, ученая степень, ученое звание)

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Ланская И.И.
	Идентификатор	R3db6324d-Lanskyall-6f410db9

(подпись)

И.И. Ланская

(расшифровка
подписи)

Заведующий выпускающей
кафедры

(должность, ученая степень, ученое звание)

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Кулешов Н.В.
	Идентификатор	Re9c42de9-KuleshovNV-bc390ed6

(подпись)

Н.В. Кулешов

(расшифровка
подписи)

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Цель освоения дисциплины: изучение законов и закономерностей современных численных методов; формирование навыков построения и применения математических моделей, возникающих на практике и проведения расчетов по таким моделям, изучение методов математического моделирования для обеспечения бесперебойной работы, правильной эксплуатации и разработки мероприятий по совершенствованию технологии производства автономных энергетических систем, установок водородной, электрохимической энергетики и их элементов.

Задачи дисциплины

- овладение основами математического мышления;
- овладение основами математической культуры;
- ознакомление со способами формализации и решения технических задач математическими методами;
- ознакомление с основными приемами обработки и представления экспериментальных данных методами математического моделирования;
- освоение методов проведения вычислительных экспериментов с использованием стандартных программных средств с целью получения математических моделей электрохимических процессов и объектов автономных энергетических систем, установок электрохимической энергетики и их элементов;
- освоение математических методов и техник для последующего их использования в области технологии производства автономных энергетических систем, установок электрохимической энергетики и их элементов;
- овладение основами принятия и обоснования конкретных математических решений при последующей профессиональной деятельности в области технологии производства автономных энергетических систем, установок электрохимической энергетики и их элементов.

Формируемые у обучающегося **компетенции** и запланированные **результаты обучения** по дисциплине, соотнесенные с **индикаторами достижения компетенций**:

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции	Запланированные результаты обучения
ПК-3 Способен к обеспечению бесперебойной работы, правильной эксплуатации и разработке мероприятий по совершенствованию технологии производства автономных энергетических систем, установок водородной, электрохимической энергетики и их элементов	ИД-3 _{ПК-3} Выполняет сбор, обработку, анализ и обобщение отечественного и международного опыта в области исследований и разработки автономных энергетических систем, установок водородной, электрохимической энергетики и их элементов	знать: - современные методы построения математических моделей для задач, возникающих на практике и численные методы их решения с применением интегрированных пакетов программ: MATHCAD, MATLAB.; - основные понятия современных численных методов, используемых для разработки и эксплуатации автономных энергетических систем, установок водородной, электрохимической энергетики и их элементов. уметь: - грамотно и профессионально строить математические модели основных процессов автономных энергетических систем, установок водородной, электрохимической энергетики и их

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции	Запланированные результаты обучения
		элементов, рассчитывать бесперебойные режимы работы, правильной эксплуатации, ремонта и модернизации энергетического, теплотехнического оборудования предприятий энергетического профиля; - применять свои знания современных численных методов к решению практических задач по разработке, модернизации, правильной эксплуатации оборудования электрохимических энергоустановок и в водородной энергетике.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ ВО

Дисциплина относится к основной профессиональной образовательной программе Автономные энергетические системы. Водородная и электрохимическая энергетика (далее – ОПОП), направления подготовки 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника, уровень образования: высшее образование - магистратура.

Требования к входным знаниям и умениям:

- знать «Химия», «Физика», «Математика» и «Информатика»
- уметь Делать расчеты химических и физических процессов с применением математических методов

Результаты обучения, полученные при освоении дисциплины, необходимы при выполнении выпускной квалификационной работы.

3. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

3.1 Структура дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 зачетных единицы, 108 часов.

№ п/п	Разделы/темы дисциплины/формы промежуточной аттестации	Всего часов на раздел	Семестр	Распределение трудоемкости раздела (в часах) по видам учебной работы										Содержание самостоятельной работы/ методические указания	
				Контактная работа							СР				
				Лек	Лаб	Пр	Консультация		ИКР		ПА	Работа в семестре	Подготовка к аттестации /контроль		
КПР	ГК	ИККП	ТК												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
1	Численное дифференцирование. Неустойчивость численного дифференцирования.	22	1	4	-	8	-	-	-	-	-	10	-	<p><u>Подготовка к практическим занятиям:</u> Изучение материала по разделу "Численное дифференцирование. Неустойчивость численного дифференцирования." подготовка к выполнению заданий на практических занятиях</p> <p><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u> Изучение дополнительного материала по разделу "Численное дифференцирование. Неустойчивость численного дифференцирования." <u>Изучение материалов литературных источников:</u> [1], стр. 1-160</p>	
1.1	Численное дифференцирование. Неустойчивость численного дифференцирования.	22		4	-	8	-	-	-	-	-	10	-		
2	Сходимость и устойчивость разностных схем. Основная теорема о сходимости разностных схем	24		4	-	8	-	-	-	-	-	12	-		<p><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u> Изучение дополнительного материала по разделу "Сходимость и устойчивость разностных схем. Основная теорема о сходимости разностных схем"</p> <p><u>Подготовка к практическим занятиям:</u> Изучение материала по разделу "Сходимость и устойчивость разностных схем. Основная теорема о сходимости разностных схем" подготовка к выполнению заданий на практических занятиях</p> <p><u>Подготовка к контрольной работе:</u></p>
2.1	Сходимость и устойчивость разностных схем. Основная теорема о сходимости разностных схем	24		4	-	8	-	-	-	-	-	12	-		

													Изучение материалов по разделу Сходимость и устойчивость разностных схем. Основная теорема о сходимости разностных схем и подготовка к контрольной работе <u>Изучение материалов литературных источников:</u> [1], стр. 431-435, 453-475
3	Консервативные разностные схемы.	22	4	-	8	-	-	-	-	-	10	-	<u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u> Изучение
3.1	Консервативные разностные схемы.	22	4	-	8	-	-	-	-	-	10	-	дополнительного материала по разделу "Консервативные разностные схемы." <u>Подготовка к практическим занятиям:</u> Изучение материала по разделу "Консервативные разностные схемы." подготовка к выполнению заданий на практических занятиях <u>Изучение материалов литературных источников:</u> [1], стр. 431-435, 453-475
4	Схемы с не дивергентным уравнением энергии. Условия полной консервативности, устойчивости. Дробное дифференцирование. Решение задачи Бернулли и задачи Абея	22	4	-	8	-	-	-	-	-	10	-	<u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u> Изучение дополнительного материала по разделу "Схемы с не дивергентным уравнением энергии. Условия полной консервативности, устойчивости. Дробное дифференцирование. Решение задачи Бернулли и задачи Абея" <u>Подготовка к практическим занятиям:</u> Изучение материала по разделу "Схемы с не дивергентным уравнением энергии. Условия полной консервативности, устойчивости. Дробное дифференцирование. Решение задачи Бернулли и задачи Абея" подготовка к выполнению заданий на практических занятиях
4.1	Схемы с не дивергентным уравнением энергии. Условия полной консервативности, устойчивости. Дробное дифференцирование.	22	4	-	8	-	-	-	-	-	10	-	<u>Подготовка к контрольной работе:</u> Изучение материалов по разделу Схемы с не дивергентным уравнением энергии. Условия полной консервативности, устойчивости.

	Решение задачи Бернулли и задачи Абея												Дробное дифференцирование. Решение задачи Бернулли и задачи Абея и подготовка к контрольной работе <u>Изучение материалов литературных источников:</u> [1], стр. 161-165, 191-210 [2], стр. 386-398
	Зачет с оценкой	18.0	-	-	-	-	-	-	-	0.3	-	17.7	
	Всего за семестр	108.0	16	-	32	-	-	-	-	0.3	42	17.7	
	Итого за семестр	108.0	16	-	32	-	-	-	-	0.3	59.7		

Примечание: Лек – лекции; Лаб – лабораторные работы; Пр – практические занятия; КПр – аудиторные консультации по курсовым проектам/работам; ИККП – индивидуальные консультации по курсовым проектам/работам; ГК- групповые консультации по разделам дисциплины; СР – самостоятельная работа студента; ИКР – иная контактная работа; ТК – текущий контроль; ПА – промежуточная аттестация

3.2 Краткое содержание разделов

1. Численное дифференцирование. Неустойчивость численного дифференцирования.

1.1. Численное дифференцирование. Неустойчивость численного дифференцирования.

Необходимые сведения из линейной алгебры: нормированное линейное пространство; линейный оператор; норма оператора, спектральный радиус; обусловленность матриц. Численное дифференцирование. Неустойчивость численного дифференцирования. Оптимальный шаг и его оценка. Оценка оптимального шага методом сокращающихся знаков..

2. Сходимость и устойчивость разностных схем. Основная теорема о сходимости разностных схем

2.1. Сходимость и устойчивость разностных схем. Основная теорема о сходимости разностных схем

Основные понятия теории разностных схем. Равномерная и неравномерная сетки. Пространство сеточных функций. Нормы в пространстве сеточных функций. Дифференцирование и интегрирование в пространстве сеточных функций. Основные формулы дифференциального и интегрального исчисления в пространстве сеточных функций. Недостатки неравномерных сеток. Разностная аппроксимация дифференциальных уравнений. Понятие разностной схемы. Постановка разностной задачи. Сходимость и устойчивость разностных схем. Основная теорема о сходимости разностных схем. Пример построения и исследования разностной схемы для краевой задачи Штурма-Лиувилля. Пример неустойчивой разностной схемы..

3. Консервативные разностные схемы.

3.1. Консервативные разностные схемы.

Консервативные разностные схемы. Пример А.А. Самарского влияния не консервативности. Интегро-интерполяционный метод построения консервативных разностных схем. Построение консервативной разностной Разностные схемы для уравнений с частными производными. Понятие шаблона разностной схемы. Схема с весами. Явные и неявные разностные схемы. Модельные уравнения для процессов переноса. Задачи Коши, краевая задача для уравнения переноса. Схема бегущей волны. Устойчивость явной и неявной разностных схем. Задачи Коши для линейного параболического уравнения с переменными коэффициентами по методу Куранта. Спектральный признак устойчивости Неймана по начальным данным. Содержательный смысл спектральной устойчивости..

4. Схемы с не дивергентным уравнением энергии. Условия полной консервативности, устойчивости. Дробное дифференцирование. Решение задачи Бернулли и задачи Абеля

4.1. Схемы с не дивергентным уравнением энергии. Условия полной консервативности, устойчивости. Дробное дифференцирование. Решение задачи Бернулли и задачи Абеля

Полностью консервативные разностные схемы. Схемы с недивергентным уравнением энергии. Условия полной консервативности. Анализ семейства консервативных разностных схем. Дробное дифференцирование. Решение задачи Бернулли и задачи Абеля..

3.3. Темы практических занятий

1. Введение в элементарную теорию погрешностей: источники и классификация погрешностей численного решения задачи, приближенные числа, абсолютная и условная погрешности, погрешности арифметических операций, погрешность

- функции.(2час);
2. Необходимые сведения из линейной алгебры: нормированное линейное пространство; линейный оператор; норма оператора, спектральный радиус; обусловленность матриц.(2час);
 3. Прямые решения линейных систем. Схема метода исключения (метод Гаусса-Жордана). Граф распространения ошибок. Оптимизация метода Гаусса. Метод прогонки. Условия устойчивости метода прогонки. Итерационные методы решения линейных систем. Примеры итерационных процессов.(4час);
 4. Задачи нелинейного программирования. Метод Ньютона, как линеаризация исходной задачи. Модификация метода Ньютона с целью ослабления требования к начальному приближению. Нормировка задачи как метод улучшения сходимости. Метод продолжения по параметру.(2час);
 5. Численное дифференцирование. Неустойчивость численного дифференцирования. Оптимальный шаг и его оценка. Оценка оптимального шага методом сокращающихся знаков.(2час);
 6. Основные понятия теории разностных схем. Равномерная и неравномерная сетки. Пространство сеточных функций. Нормы в пространстве сеточных функций. Дифференцирование и интегрирование в пространстве сеточных функций. Основные формулы дифференциального и интегрального исчисления в пространстве сеточных функций. Недостатки неравномерных сеток.(2час);
 7. Разностная аппроксимация дифференциальных уравнений. Понятие разностной схемы. Постановка разностной задачи. Сходимость и устойчивость разностных схем. Основная теорема о сходимости разностных схем. Пример построения и исследования разностной схемы для краевой задачи Штурма-Лиувилля. Пример неустойчивой разностной схемы.(2час);
 8. Консервативные разностные схемы. Пример А.А. Самарского влияния не консервативности. Интегро-интерполяционный метод построения консервативных разностных схем. Построение консервативной разностной (2час);
 9. Разностные схемы. Уравнение с частными производными. Понятие шаблона разностной схемы. Схема с весами. Явные и неявные разностные схемы. Модельные уравнения для процессов переноса. Задачи Коши, краевая задача для уравнения переноса. Схема бегущей волны.(2час);
 10. Устойчивость явной и неявной разностных схем задачи Коши для линейного параболического уравнения с переменными коэффициентами по методу Куранта. Спектральный признак устойчивости Неймана по начальным данным. Содержательный смысл спектральной устойчивости. (2час);
 11. Практика использования спектрального признака. Устойчивость краевых условий К.И. Бабенко и И.М. Гельфанда. Устойчивость и погрешность расчётов.(2час);
 12. Построение разностных схем для нелинейных разностных схем. Принцип замороженных коэффициентов. Линеаризация и исследование устойчивости.(2час);
 13. Полностью консервативные разностные схемы. Схемы с недивергентным уравнением энергии. Условия полной консервативности. Анализ семейства консервативных разностных схем.(2час);
 14. Элементы вариационного анализа. Дробное дифференцирование и интегрирование. Задача Бернулли о брахистохроне. Задача Абеля о таутохронной кривой.(4час).

3.4. Темы лабораторных работ

не предусмотрено

3.5 Консультации

Групповые консультации по разделам дисциплины (ГК)

1. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Численное дифференцирование. Неустойчивость численного дифференцирования."
2. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Сходимость и устойчивость разностных схем. Основная теорема о сходимости разностных схем"
3. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Консервативные разностные схемы."
4. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Схемы с не дивергентным уравнением энергии. Условия полной консервативности, устойчивости. Дробное дифференцирование. Решение задачи Бернулли и задачи Абеля"

3.6 Тематика курсовых проектов/курсовых работ

Курсовой проект/ работа не предусмотрены

3.7. Соответствие разделов дисциплины и формируемых в них компетенций

Запланированные результаты обучения по дисциплине (в соответствии с разделом 1)	Коды индикаторов	Номер раздела дисциплины (в соответствии с п.3.1)				Оценочное средство (тип и наименование)
		1	2	3	4	
Знать:						
основные понятия современных численных методов, используемых для разработки и эксплуатации автономных энергетических систем, установок водородной, электрохимической энергетики и их элементов	ИД-3ПК-3	+				Контрольная работа/Численное дифференцирование
современные методы построения математических моделей для задач, возникающих на практике и численные методы их решения с применением интегрированных пакетов программ: MATHCAD, MATLAB.	ИД-3ПК-3		+			Контрольная работа/Сходимость и устойчивость разностных схем. Основная теорема о сходимости разностных схем
Уметь:						
применять свои знания современных численных методов к решению практических задач по разработке, модернизации, правильной эксплуатации оборудования электрохимических энергоустановок и в водородной энергетике	ИД-3ПК-3				+	Контрольная работа/Схемы с не дивергентным уравнением энергии, условия полной консервативности
грамотно и профессионально строить математические модели основных процессов автономных энергетических систем, установок водородной, электрохимической энергетики и их элементов, рассчитывать бесперебойные режимы работы, правильной эксплуатации, ремонта и модернизации энергетического, теплотехнического оборудования предприятий энергетического профиля	ИД-3ПК-3			+		Контрольная работа/Консервативные разностные схемы

4. КОМПЕТЕНТНОСТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОСВОЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (ТЕКУЩИЙ КОНТРОЛЬ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНАЯ АТТЕСТАЦИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ)

4.1. Текущий контроль успеваемости

1 семестр

Форма реализации: Письменная работа

1. Консервативные разностные схемы (Контрольная работа)
2. Схемы с не дивергентным уравнением энергии, условия полной консервативности (Контрольная работа)
3. Сходимость и устойчивость разностных схем. Основная теорема о сходимости разностных схем (Контрольная работа)
4. Численное дифференцирование (Контрольная работа)

Балльно-рейтинговая структура дисциплины является приложением А.

4.2 Промежуточная аттестация по дисциплине

Зачет с оценкой (Семестр №1)

Оценка определяется в соответствии с Положением о балльно-рейтинговой системе для студентов НИУ «МЭИ» на основании семестровой и аттестационной составляющих.

В диплом выставляется оценка за 1 семестр.

Примечание: Оценочные материалы по дисциплине приведены в фонде оценочных материалов ОПОП.

5. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

5.1 Печатные и электронные издания:

1. Амосов, А. А. Вычислительные методы для инженеров : Учебное пособие для втузов / А. А. Амосов, Ю. А. Дубинский, Н. В. Копченова . – М. : Высшая школа, 1994 . – 544 с. - ISBN 5-06-000625-5 .;
2. Коровин Н. В., Кулешов Н. В., Гончарук О. Н., Камышова В. К., Ланская И. И., Мясникова Н. В., Осина М. А., Удрис Е. Я., Яштулов Н. А.- "Общая химия. Теория и задачи", (5-е изд., стер.), Издательство: "Лань", Санкт-Петербург, 2021 - (492 с.)
<https://e.lanbook.com/book/158949>.

5.2 Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:

1. Office / Российский пакет офисных программ;
2. Windows / Операционная система семейства Linux;
3. Майнд Видеоконференции.

5.3 Интернет-ресурсы, включая профессиональные базы данных и информационно-справочные системы:

1. ЭБС Лань - <https://e.lanbook.com/>
2. ЭБС "Университетская библиотека онлайн" - http://biblioclub.ru/index.php?page=main_ub_red
3. Научная электронная библиотека - <https://elibrary.ru/>
4. База данных Web of Science - <http://webofscience.com/>

5. База данных Scopus - <http://www.scopus.com>
6. Журнал Science - <https://www.sciencemag.org/>
7. Электронная библиотека МЭИ (ЭБ МЭИ) - <http://elib.mpei.ru/login.php>
8. Портал открытых данных Российской Федерации - <https://data.gov.ru>
9. База открытых данных Министерства труда и социальной защиты РФ - <https://rosmintrud.ru/opendata>
10. База открытых данных профессиональных стандартов Министерства труда и социальной защиты РФ - <http://profstandart.rosmintrud.ru/obshchiy-informatsionnyy-blok/natsionalnyy-reestr-professionalnykh-standartov/>
11. База открытых данных Министерства экономического развития РФ - <http://www.economy.gov.ru>

6. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Тип помещения	Номер аудитории, наименование	Оснащение
	отсутствует	

БАЛЛЬНО-РЕЙТИНГОВАЯ СТРУКТУРА ДИСЦИПЛИНЫ

Математическое моделирование

(название дисциплины)

1 семестр

Перечень контрольных мероприятий текущего контроля успеваемости по дисциплине:

- КМ-1 Численное дифференцирование (Контрольная работа)
- КМ-2 Сходимость и устойчивость разностных схем. Основная теорема о сходимости разностных схем (Контрольная работа)
- КМ-3 Консервативные разностные схемы (Контрольная работа)
- КМ-4 Схемы с не дивергентным уравнением энергии, условия полной консервативности (Контрольная работа)

Вид промежуточной аттестации – Зачет с оценкой.

Номер раздела	Раздел дисциплины	Индекс КМ:	КМ-1	КМ-2	КМ-3	КМ-4
		Неделя КМ:	4	8	12	15
1	Численное дифференцирование. Неустойчивость численного дифференцирования.					
1.1	Численное дифференцирование. Неустойчивость численного дифференцирования.		+			
2	Сходимость и устойчивость разностных схем. Основная теорема о сходимости разностных схем					
2.1	Сходимость и устойчивость разностных схем. Основная теорема о сходимости разностных схем			+		
3	Консервативные разностные схемы.					
3.1	Консервативные разностные схемы.				+	
4	Схемы с не дивергентным уравнением энергии. Условия полной консервативности, устойчивости. Дробное дифференцирование. Решение задачи Бернулли и задачи Абеля					
4.1	Схемы с не дивергентным уравнением энергии. Условия полной консервативности, устойчивости. Дробное дифференцирование. Решение задачи Бернулли и задачи Абеля					+
Вес КМ, %:			25	25	25	25