

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

---

Направление подготовки/специальность: 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Наименование образовательной программы: Промышленная теплоэнергетика

Уровень образования: высшее образование - бакалавриат

Форма обучения: Очная

**Рабочая программа дисциплины**  
**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ**  
**ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Блок:	Блок 1 «Дисциплины (модули)»
Часть образовательной программы:	Часть, формируемая участниками образовательных отношений
№ дисциплины по учебному плану:	Б1.Ч.09.06
Трудоемкость в зачетных единицах:	7 семестр - 5;
Часов (всего) по учебному плану:	180 часов
Лекции	7 семестр - 32 часа;
Практические занятия	7 семестр - 48 часа;
Лабораторные работы	не предусмотрено учебным планом
Консультации	7 семестр - 2 часа;
Самостоятельная работа	7 семестр - 97,5 часа;
в том числе на КП/КР	не предусмотрено учебным планом
Иная контактная работа	проводится в рамках часов аудиторных занятий
включая:	
Решение задач	
Промежуточная аттестация:	
Экзамен	7 семестр - 0,5 часа;

Москва 2022

## ПРОГРАММУ СОСТАВИЛ:

Преподаватель

(должность)

	<b>Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»</b>	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Курзанов С.Ю.
	Идентификатор	R76dcd884-KurzanovSY-80905102

(подпись)

С.Ю. Курзанов

(расшифровка  
подписи)

## СОГЛАСОВАНО:

Руководитель  
образовательной  
программы

(должность, ученая степень, ученое  
звание)

	<b>Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»</b>	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Шелгинский А.Я.
	Идентификатор	Rf4e216f4-ShelginskyAY-88390edf

(подпись)

А.Я.

Шелгинский

(расшифровка подписи)

Заведующий выпускающей  
кафедры

(должность, ученая степень, ученое  
звание)

	<b>Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»</b>	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Яворовский Ю.В.
	Идентификатор	R7e35b260-YavorovskyYV-dabb149

(подпись)

Ю.В.

Яворовский

(расшифровка подписи)

## 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

**Цель освоения дисциплины:** дисциплины состоит в изучении способов моделирования теплоэнергетических и технологических процессов с использованием современного программного обеспечения, выработка навыков у студентов самостоятельно формулировать задачи расчета и оптимизации систем и процессов промышленной теплоэнергетики (ПТ), а также умения применять численные методы для решения поставленных задач.

### Задачи дисциплины

- выработка навыков самостоятельного формулирования задачи расчета и оптимизации систем и процессов промышленной теплоэнергетики (ПТ);
- научиться применять численные методы для решения поставленных задач с целью повышения энергетической эффективности установок ПТ;
- познакомиться с принципами построения численных моделей процессов и систем ПТ, создания системы балансовых уравнений и уравнений процессов, с основами численного решения системы уравнений;
- научиться мыслить системно на примерах повышения энергетической эффективности объектов ПТ с учетом технологических, экологических и экономических факторов;
- научиться анализировать существующие системы и их элементы, разрабатывать и внедрять необходимые изменения в их структуре с позиций повышения эффективности и энергосбережения;
- получить информацию о новых направлениях в совершенствовании данных систем в отечественной и зарубежной практике, развивать способности объективно оценивать преимущества и недостатки систем и их элементов, как отечественных, так и зарубежных;
- познакомиться обучающихся с различными программами для построения математических моделей. На примере MathCad программной средой разработки Python;
- получить информацию о различных средах и методах моделирования теплоэнергетических процессов;
- научиться анализировать результаты моделирования, производить поиск оптимизационного решения с помощью всевозможных методов.

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-2 способен участвовать в проектировании промышленных и коммунальных теплоэнергетических систем и комплексов	ИД-1 <sub>ПК-2</sub> участвует в сборе и анализе данных для проектирования, и создании конкурентно-способных вариантов технических решений	знать: - подходы построения балансовых математических моделей на основе теории графов; - алгоритмы поиска наилучшего решения с применением методов оптимизации; - принципы построения математических моделей и моделирования с использованием программного обеспечения; - основы методик проведения корреляционного и регрессионного исследований.

## **2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ ВО**

Дисциплина относится к основной профессиональной образовательной программе Промышленная теплоэнергетика (далее – ОПОП), направления подготовки 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника, уровень образования: высшее образование - бакалавриат.

Базируется на уровне среднего общего образования.

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 5 зачетных единиц, 180 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	Общие понятия теории систем. Математическое моделирование. Построение математической модели теплоэнергетической установки	36	7	8	-	12	-	-	-	-	-	16	-	<p><b><u>Подготовка к текущему контролю:</u></b> Повторение материала по разделу "Общие понятия теории систем. Математическое моделирование. Построение математической модели теплоэнергетической установки"</p> <p><b><u>Подготовка расчетных заданий:</u></b> Задание ориентировано на решения задачи по разделу "Общие понятия теории систем. Математическое моделирование. Построение математической модели теплоэнергетической установки". Студенты необходимо повторить теоретический материал, разобрать примеры решения аналогичных задач. провести расчеты по варианту задания и сделать выводы</p> <p><b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], стр. 4-13, стр. 16-22 [2], стр. 6 - 380 [3], стр. 15-220</p>	
1.1	Общие понятия теории систем. Математическое моделирование. Теория графов. Построение балансовых уравнений на основе графического метода. Построение математической модели теплоэнергетической установки.	36		8	-	12	-	-	-	-	-	-	16		-
2	Методы оптимизации	36		8	-	12	-	-	-	-	-	-	16		-
2.1	Постановка задачи оптимизации теплоэнергетической установки. Реализация	36		8	-	12	-	-	-	-	-	-	16		-

	задачи оптимизации на языке программирования. Сравнение методов оптимизации												разделу "Методы оптимизации". Студенты необходимо повторить теоретический материал, разобрать примеры решения аналогичных задач. провести расчеты по варианту задания и сделать выводы <b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], стр. 44-65
3	Примеры применения методов оптимизации. Методы оптимизации. Многокритериальная оптимизация математической модели газотурбинной установки	36	8	-	12	-	-	-	-	-	16	-	<b><u>Подготовка расчетных заданий:</u></b> Задание ориентировано на решения задачи по разделу "Примеры применения методов оптимизации. Методы оптимизации. Многокритериальная оптимизация математической модели газотурбинной установки". Студенты необходимо повторить теоретический материал, разобрать примеры решения аналогичных задач. Провести расчеты по варианту задания и сделать выводы
3.1	Классификация математических моделей. Математическая модель газотурбинной установки. Области применения методов оптимизации в инженерной практике. Анализ точности и сходимости математической модели	36	8	-	12	-	-	-	-	-	16	-	<b><u>Подготовка к текущему контролю:</u></b> Повторение материала по разделу "Общие понятия теории систем. Математическое моделирование. Построение математической модели теплоэнергетической установки" <b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], стр. 13-15, стр. 22-29, стр. 30-44 [2], стр. 6 - 380
4	Применение методов математической статистики для построения математических моделей. Статистические пакеты и их применение для статистического	36	8	-	12	-	-	-	-	-	16	-	<b><u>Подготовка к текущему контролю:</u></b> Повторение материала по разделу "Применение методов математической статистики для построения математических моделей. Статистические пакеты и их применение для статистического исследования зависимостей" <b><u>Проведение исследований:</u></b> Задание ориентировано на решения исследовательской задачи по разделу

	исследования зависимостей													"Применение методов математической статистики для построения математических моделей. Статистические пакеты и их применение для статистического исследования зависимостей". Студенты необходимо повторить теоретический материал, разобрать примеры решения аналогичных задач. провести расчеты по варианту задания и сделать выводы. <b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], стр. 43-44, стр. 66-72
4.1	Применение методов математической статистики для построения математических моделей. Корреляционный анализ. Регрессионный анализ. Параметризация регрессионной модели. Оценка точности регрессионной зависимости Статистические пакеты и их применение для статистического исследования зависимостей	36	8	-	12	-	-	-	-	-	16	-		
	Экзамен	36.00	-	-	-	-	2	-	-	0.5	-	33.50		
	Всего за семестр	180.00	32	-	48	-	2	-	-	0.5	64	33.50		
	Итого за семестр	180.00	32	-	48		2		-	0.5		97.50		

**Примечание:** Лек – лекции; Лаб – лабораторные работы; Пр – практические занятия; КПП – 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. Общие понятия теории систем. Математическое моделирование. Построение математической модели теплоэнергетической установки

1.1. Общие понятия теории систем. Математическое моделирование. Теория графов. Построение балансовых уравнений на основе графического метода. Построение математической модели теплоэнергетической установки.

Основные понятия и определения. Свойства системы, системный подход системный анализ. Системный анализ газотурбинной установки. Математическое моделирование. Представление системы в виде графа. Составление системы балансовых уравнений для каждого элемента системы на основе теории графов. Представление систем балансовых уравнений в виде алгоритмов. Объединение алгоритмов в единую математическую модель. Методика расчета количества оптимизируемых параметров. Этапы построения математической модели и численное моделирование. Поиск решений методом последовательного приближения и проведение итерационных расчетов. Представление результатов в графическом и табличном виде. Определение функции цели для оптимизационной задачи. Формулирование задачи оптимизации.

#### 2. Методы оптимизации

2.1. Постановка задачи оптимизации теплоэнергетической установки. Реализация задачи оптимизации на языке программирования. Сравнение методов оптимизации

Работа с меню среды разработки: создание нового проекта, вывод результатов части (создание элементов для управления расчетом и вывода информации с результатами). Математическая постановка задачи оптимизации. Линейное и нелинейное программирование. Нахождение минимумов и максимумов. Оптимизация функции одной переменной и функции многих переменных. Методы безусловной и условной оптимизации. Прямые и косвенные методы. Градиентные методы 1-го и 2-го порядка. Линии уровня. Метод покоординатного спуска. Метод наискорейшего спуска (подъема). Метод Флетчера-Ривса. Метод Дэвидона - Флетчера - Пауэлла. Методы прямого поиска нулевого порядка. Метод Хука-Дживса. Метод Розенброка. Симплексный метод. Метод Нелдера-Мида. Метод сопряженных направлений Пауэлла. Метод штрафных функций. Метод прямого поиска возможных направлений DSFD. Сравнение методов оптимизации. Многокритериальная оптимизация. Классификация методов оптимизации. Поиск глобального оптимума. Блок-схема алгоритма метода оптимизации. Интерпретация алгоритмов и исправление ошибок (примеры исправления часто встречаемых ошибок). Пошаговая компиляция с просмотром промежуточных результатов расчета. Представление и обработка результатов расчета.

#### 3. Примеры применения методов оптимизации. Методы оптимизации.

##### Многокритериальная оптимизация математической модели газотурбинной установки

3.1. Классификация математических моделей. Математическая модель газотурбинной установки. Области применения методов оптимизации в инженерной практике. Анализ точности и сходимости математической модели

Классификация математических моделей. Математическая модель газотурбинной установки. Построение графов для любой теплоэнергетической системы. Построение графа для системы, состоящей из газотурбинной установки и котла утилизатора в сочетании с дополнительным котлом. Составление балансовых уравнений на основе графа. Пример расчета количества оптимизируемых параметров. Области применения методов оптимизации в инженерной практике. Организация условий и циклов расчета. Построение блок-схемы расчета (ознакомления с принципами построения блок-схем). Реализация

алгоритма на языке программирования в соответствии с блок схемой. Основы синтаксиса языка программирования: типы переменных, объявление переменных, массивов переменных, присвоение, организации циклов, формирования логических условий, описание функций, присоединение стандартных библиотек. Компиляция алгоритма и исправление ошибок (примеры исправления часто встречаемых ошибок). Пошаговая компиляция с просмотром промежуточных результатов расчета. Представление и обработка результатов расчета.

#### 4. Применение методов математической статистики для построения математических моделей. Статистические пакеты и их применение для статистического исследования зависимостей

4.1. Применение методов математической статистики для построения математических моделей. Корреляционный анализ. Регрессионный анализ. Параметризация регрессионной модели. Оценка точности регрессионной зависимости. Статистические пакеты и их применение для статистического исследования зависимостей

Общая схема взаимодействия переменных при статистическом исследовании зависимостей. Этапы статистического исследования зависимостей. Корреляционный анализ. Коэффициент корреляции. Регрессионный анализ. Численный метод наименьших квадратов. Оценка точности статистической зависимости на основе суммы квадратов остатков. Коэффициент детерминации. Статистические пакеты (Statsmodels, Numerical Python, Scientific Python) и их применение для статистического исследования зависимостей.

### **3.3. Темы практических занятий**

1. Математическое моделирование и оптимизация ГТУ по одному параметру в среде MathCad;
2. Постановка задачи оптимизации теплоэнергетических установок и математических функций в программной среде Python;
3. Построение и оптимизация математической модели газотурбинной установки в программной среде Python;
4. Проведение корреляционного и регрессионного анализа статических данных в программной среде Python.

### **3.4. Темы лабораторных работ**

не предусмотрено

### **3.5 Консультации**

#### Групповые консультации по разделам дисциплины (ГК)

1. Обсуждение материалов по разделам "Общие понятия теории систем. Математическое моделирование. Построение математической модели теплоэнергетической установки"
2. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Методы оптимизации"
3. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Примеры применения методов оптимизации. Методы оптимизации. Многокритериальная оптимизация математической модели газотурбинной установки"
4. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Применение методов математической статистики для построения математических моделей. Статистические пакеты и их применение для статистического исследования зависимостей"

### **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	
<b>Знать:</b>						
основы методик проведения корреляционного и регрессионного исследований	ИД-1ПК-2				+	Решение задач/Индивидуальное задание №4
принципы построения математических моделей и моделирования с использованием программного обеспечения	ИД-1ПК-2			+		Решение задач/Индивидуальное задание №3
алгоритмы поиска наилучшего решения с применением методов оптимизации	ИД-1ПК-2		+			Решение задач/Индивидуальное задание №2
подходы построения балансовых математических моделей на основе теории графов	ИД-1ПК-2	+				Решение задач/Индивидуальное задание №1

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

### **4.1. Текущий контроль успеваемости**

**7 семестр**

Форма реализации: Компьютерное задание

1. Индивидуальное задание №1 (Решение задач)
2. Индивидуальное задание №2 (Решение задач)
3. Индивидуальное задание №3 (Решение задач)
4. Индивидуальное задание №4 (Решение задач)

Балльно-рейтинговая структура дисциплины является приложением А.

### **4.2 Промежуточная аттестация по дисциплине**

Экзамен (Семестр №7)

В диплом выставляется оценка за 7 семестр.

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

## **5. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **5.1 Печатные и электронные издания:**

1. Султангузин, И. А. Математическое моделирование и оптимизация промышленных теплоэнергетических систем : учебное пособие по курсу "Алгоритмизация, моделирование и оптимизация теплоэнергетических систем промышленных предприятий" по направлению "Теплоэнергетика" / И. А. Султангузин, Ю. В. Яворовский, Моск. энерг. ин-т (МЭИ ТУ) . – М. : Издательский дом МЭИ, 2009 . – 92 с. - ISBN 978-5-383-00295-7 .  
[http://elib.mpei.ru/action.php?kt\\_path\\_info=ktcore.SecViewPlugin.actions.document&fDocumentId=782](http://elib.mpei.ru/action.php?kt_path_info=ktcore.SecViewPlugin.actions.document&fDocumentId=782);
2. Очков, В. Ф. Mathcad 14 для студентов и инженеров. : русская версия / В. Ф. Очков . – СПб. : БХВ-Петербург, 2009 . – 512 с. - ISBN 978-5-9775040-3-4 .;
3. А. Г. Семенов, И. А. Печерских- "Математическое и компьютерное моделирование", Издательство: "Кемеровский государственный университет", Кемерово, 2019 - (237 с.)  
<https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=574121>.

### **5.2 Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:**

1. СДО "Прометей";
2. Windows / Операционная система семейства Linux;
3. Майнд Видеоконференции;
4. Python.

### **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](http://biblioclub.ru/index.php?page=main_ub_red)

3. Электронная библиотека МЭИ (ЭБ МЭИ) - <http://elib.mpei.ru/login.php>

#### 6. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Тип помещения	Номер аудитории, наименование	Оснащение
Учебные аудитории для проведения лекционных занятий и текущего контроля	3-207, Компьютерный класс каф. "ПТС"	стеллаж для хранения книг, стул, шкаф, шкаф для хранения инвентаря, стол письменный
Учебные аудитории для проведения практических занятий, КР и КП	3-207, Компьютерный класс каф. "ПТС"	стеллаж для хранения книг, стул, шкаф, шкаф для хранения инвентаря, стол письменный
Учебные аудитории для проведения промежуточной аттестации	3-207, Компьютерный класс каф. "ПТС"	стеллаж для хранения книг, стул, шкаф, шкаф для хранения инвентаря, стол письменный
Помещения для самостоятельной работы	НТБ-303, Компьютерный читальный зал	стол компьютерный, стул, стол письменный, вешалка для одежды, компьютерная сеть с выходом в Интернет, компьютер персональный, принтер, кондиционер
Помещения для консультирования	В-204, Кабинет сотрудников каф. "ПТС"	стеллаж, стол преподавателя, стол для оргтехники, стул, шкаф для документов, шкаф для одежды, компьютер персональный, принтер, холодильник
Помещения для хранения оборудования и учебного инвентаря	В-206, Кабинет сотрудников каф. "ПТС"	стул, шкаф для документов, стол письменный, кондиционер, дипломные и курсовые работы студентов

## БАЛЛЬНО-РЕЙТИНГОВАЯ СТРУКТУРА ДИСЦИПЛИНЫ

### Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических систем

(название дисциплины)

#### 7 семестр

#### Перечень контрольных мероприятий текущего контроля успеваемости по дисциплине:

- КМ-1 Индивидуальное задание №1 (Решение задач)
- КМ-2 Индивидуальное задание №2 (Решение задач)
- КМ-3 Индивидуальное задание №3 (Решение задач)
- КМ-4 Индивидуальное задание №4 (Решение задач)

Вид промежуточной аттестации – Экзамен.

Номер раздела	Раздел дисциплины	Индекс КМ:	КМ-1	КМ-2	КМ-3	КМ-4
		Неделя КМ:	3	7	11	14
1	Общие понятия теории систем. Математическое моделирование. Построение математической модели теплоэнергетической установки					
1.1	Общие понятия теории систем. Математическое моделирование. Теория графов. Построение балансовых уравнений на основе графического метода. Построение математической модели теплоэнергетической установки.		+			
2	Методы оптимизации					
2.1	Постановка задачи оптимизации теплоэнергетической установки. Реализация задачи оптимизации на языке программирования. Сравнение методов оптимизации			+		
3	Примеры применения методов оптимизации. Методы оптимизации. Многокритериальная оптимизация математической модели газотурбинной установки					
3.1	Классификация математических моделей. Математическая модель газотурбинной установки. Области применения методов оптимизации в инженерной практике. Анализ точности и сходимости математической модели				+	
4	Применение методов математической статистики для построения математических моделей. Статистические пакеты и их применение для статистического исследования зависимостей					
4.1	Применение методов математической статистики для построения математических моделей. Корреляционный анализ. Регрессионный анализ. Параметризация регрессионной модели. Оценка точности регрессионной зависимости. Статистические пакеты и их применение для статистического исследования зависимостей					+
Вес КМ, %:			20	25	35	20

