

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

---

Направление подготовки/специальность: 13.04.03 Энергетическое машиностроение

Наименование образовательной программы: Производство энергетического оборудования

Уровень образования: высшее образование - магистратура

Форма обучения: Очная

**Рабочая программа дисциплины**  
**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВАРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ**


<b>Блок:</b>	<b>Блок 1 «Дисциплины (модули)»</b>
<b>Часть образовательной программы:</b>	<b>Часть, формируемая участниками образовательных отношений</b>
<b>№ дисциплины по учебному плану:</b>	<b>Б1.Ч.02</b>
<b>Трудоемкость в зачетных единицах:</b>	<b>1 семестр - 5;</b>
<b>Часов (всего) по учебному плану:</b>	<b>180 часов</b>
<b>Лекции</b>	<b>1 семестр - 16 часов;</b>
<b>Практические занятия</b>	<b>1 семестр - 32 часа;</b>
<b>Лабораторные работы</b>	<b>не предусмотрено учебным планом</b>
<b>Консультации</b>	<b>1 семестр - 2 часа;</b>
<b>Самостоятельная работа</b>	<b>1 семестр - 129,5 часа;</b>
<b>в том числе на КП/КР</b>	<b>не предусмотрено учебным планом</b>
<b>Иная контактная работа</b>	<b>проводится в рамках часов аудиторных занятий</b>
<b>включая:</b> <b>Тестирование</b> <b>Программирование (код)</b>	
<b>Промежуточная аттестация:</b>	
<b>Экзамен</b>	<b>1 семестр - 0,5 часа;</b>

**Москва 2022**

**ПРОГРАММУ СОСТАВИЛ:**

Преподаватель

(должность)

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Щербаков А.В.
	Идентификатор	Raf18b6c8-ShcherbakovAV-abf82f1

(подпись)

А.В. Щербаков

(расшифровка подписи)

**СОГЛАСОВАНО:**

Руководитель  
образовательной программы

(должность, ученая степень, ученое звание)

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Волков П.В.
	Идентификатор	Rae5921e8-VolkovPV-971cc7f4


(подпись)

П.В. Волков

(расшифровка  
подписи)

Заведующий выпускающей  
кафедры

(должность, ученая степень, ученое звание)

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Драгунов В.К.
	Идентификатор	R75d71719-DragunovVK-00c02b9f

(подпись)

В.К. Драгунов

(расшифровка  
подписи)

## 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

**Цель освоения дисциплины:** состоит в изучении принципов построения математических моделей процессов сварки, плавки, пайки и наплавки с использованием численных методов решения задач тепломассообмена для выбора оптимальных технологических режимов

### Задачи дисциплины

- освоение современных методов математического моделирования различных физических процессов, протекающих при сварке. освоение путей алгоритмизации математических моделей с использованием объектно-ориентированных сред программирования;
- приобретение навыков практического применения методов решения дифференциальных уравнении переноса вещества при сварке, плавке, пайке и наплавке;
- освоение структурированного подхода к использованию математических моделей в качестве инструмента для исследования различных физических процессов при сварке, плавке, пайке и наплавке;
- освоение методов анализа результатов вычислительных экспериментов.

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-1 Способен участвовать в проведении научных исследований в области производства объектов профессиональной деятельности, а также контроля и диагностики свойств и структуры материалов этих объектов	ИД-4 <sub>ПК-1</sub> Демонстрирует понимание основ моделирования сварочных процессов	знать: - современные подходы к моделированию течения жидкой среды со свободной поверхностью при сварке, плавке, пайке и наплавке; - концепции Эйлера и Лагранжа для моделирования процессов переноса в жидких средах при сварке, плавке, пайке и наплавке; - методы численной интерпретации граничных условий и сварочных источников теплоты для различных видов сварки; - алгоритмы численного решения многомерных задач нестационарного теплообмена при сварке, плавке, пайке и наплавке, на основе явной и неявной разностных схем.  уметь: - разрабатывать алгоритмы численного решения системы уравнений Навье-Стокса для вязкой несжимаемой жидкости с использованием подхода Эйлера и метода контрольных объемов; - применять полученные знания для самостоятельной разработки и алгоритмизации комплексных моделей сварочных процессов.

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

Дисциплина относится к основной профессиональной образовательной программе Производство энергетического оборудования (далее – ОПОП), направления подготовки 13.04.03 Энергетическое машиностроение, уровень образования: высшее образование - магистратура.

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	Цели и задачи математического моделирования. Численное решение нестационарного уравнения теплопроводности для моделирования процессов сварки, плавки, пайки и наплавки	28	1	4	-	8	-	-	-	-	-	16	-	<p><b><u>Подготовка к практическим занятиям:</u></b> Литература - в соответствии с методическими указаниями подготовка к выполнению теста №1</p> <p><b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], 15-48 [6], 12-38 [7], 8-23</p>
1.1	Цели и задачи математического моделирования процессов сварки, плавки, пайки и наплавки. Классификация дифференциальных уравнений с частными производными 2-го порядка. Уравнение теплопроводности.	28		4	-	8	-	-	-	-	-	16	-	
2	Численная интерпретация граничных условий и сварочных источников теплоты.	20		2	-	4	-	-	-	-	-	14	-	

	Алгоритмизация задач теплопереноса на основе использования метода контрольных объемов												выполнению теста №2 <b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [6], 39-64 [7], 23-28
2.1	Численная интерпретация граничных условий и сварочных источников теплоты. Алгоритмизация задач теплопереноса на основе использования метода контрольных объемов	20	2	-	4	-	-	-	-	-	14	-	
3	Концепции Эйлера и Лагранжа для моделирования тепломассообмена в жидкой ванне при сварке, плавке, сварке и наплавке	26	2	-	4	-	-	-	-	-	20	-	<b><u>Подготовка к практическим занятиям:</u></b> Литература - в соответствии с методическими указаниями подготовка к выполнению теста №3 <b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [5], 174-188
3.1	Сравнение подходов Эйлера и Лагранжа к описанию процессов переноса в жидких и газообразных средах. Уравнения Навье-Стокса. Формулировка уравнений при использовании подхода Эйлера.	26	2	-	4	-	-	-	-	-	20	-	
4	Подход Эйлера: алгоритм SIMPLE и методы аппроксимации свободной поверхности жидкой	28	4	-	8	-	-	-	-	-	16	-	<b><u>Подготовка расчетных заданий:</u></b> выполнение п. 2 расчетного задания. Подготовка к защите расчетного задания <b><u>Подготовка к практическим занятиям:</u></b> Литература - в соответствии с методическими указаниями

	ванны для моделирования процессов сварки, плавки, пайки и наплавки													<b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [6], 180-200
4.1	Подход Эйлера: алгоритм SIMPLE. Метод "линии тока - завихренность" для решения двумерных задач теплообмена в слабосжимаемых средах. Методы аппроксимации свободной поверхности жидкой ванны для моделирования процессов сварки, плавки, пайки и наплавки	28	4	-	8	-	-	-	-	-	16	-		
5	Подход Лагранжа: SPH-методы для изучения теплопереноса при сварке, плавке, сварке и наплавке	22	2	-	4	-	-	-	-	-	16	-	<b><u>Подготовка к практическим занятиям:</u></b> [8] стр. 155-170 подготовка к выполнению теста №4 <b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [2], 155-170	
5.1	Методы крупных частиц. Сравнение метода дискретных частиц и метода сглаженных частиц. Концепция метода гидродинамики сглаженных частиц.	22	2	-	4	-	-	-	-	-	16	-		
6	Комплексные модели сварочных процессов производства	20	2	-	4	-	-	-	-	-	14	-	<b><u>Подготовка к практическим занятиям:</u></b> Литература - в соответствии с методическими указаниями подготовка к	

	энергетического оборудования												выполнению теста №5
6.1	Общий подход к разработке комплексных моделей. Смешанные модели. Моделирование процессов испарения. Нелинейные задачи, возникающие при моделировании сварочных процессов	20	2	-	4	-	-	-	-	-	14	-	<b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [3], 11-25 [4], 242-284
	Экзамен	36.0	-	-	-	-	2	-	-	0.5	-	33.5	
	<b>Всего за семестр</b>	<b>180.0</b>	<b>16</b>	<b>-</b>	<b>32</b>	<b>-</b>	<b>2</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>0.5</b>	<b>96</b>	<b>33.5</b>	
	<b>Итого за семестр</b>	<b>180.0</b>	<b>16</b>	<b>-</b>	<b>32</b>	<b>2</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>0.5</b>	<b>129.5</b>			

**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. Цели и задачи математического моделирования. Численное решение нестационарного уравнения теплопроводности для моделирования процессов сварки, плавки, пайки и наплавки

1.1. Цели и задачи математического моделирования процессов сварки, плавки, пайки и наплавки. Классификация дифференциальных уравнений с частными производными 2-го порядка. Уравнение теплопроводности.

Цели и задачи математического моделирования процессов сварки, плавки, пайки и наплавки. Классификация моделей. Материальное, идеальное, знаковое, математическое моделирование. Классификация математических моделей. Аналитические, цифровые, регрессионные и смешанные модели. Адекватность и верификация моделей. Классификация дифференциальных уравнений с частными производными 2-го порядка, применяемых при моделировании физических процессов. Понятие теплопроводности. Закон Фурье. Теплоемкость тела. Уравнение теплопроводности. Уравнение теплопроводности. Начальные и краевые условия. Численные методы решения уравнения теплопроводности. Метод конечных разностей. Аппроксимация производных первого и второго порядков по методу конечных разностей. Одномерное уравнение теплопроводности в конечно-разностной форме при использовании явной и неявной разностных схем. Суть метода прогонки для решения одномерного уравнения теплопроводности. Аппроксимация граничных условий при использовании метода прогонки. Метод контрольных объемов. Решение двумерных тепловых задач с использованием явной разностной схемы (метод Эйлера). Локально-одномерные методы для решения многомерных задач с использованием неявной разностной схемы: метод переменных направлений и метод дробных шагов.

#### 2. Численная интерпретация граничных условий и сварочных источников теплоты. Алгоритмизация задач теплопереноса на основе использования метода контрольных объемов

2.1. Численная интерпретация граничных условий и сварочных источников теплоты. Алгоритмизация задач теплопереноса на основе использования метода контрольных объемов. Граничные условия первого (условие Дирихле), второго (условие Неймана), и третьего рода (условие Ньютона, условие Робена). Особенности задания граничных условий при использовании явных схем (метод половинного контрольного объема) и неявных схем. Моделирование сварочных источников теплоты. Способы задания сварочных источников теплоты в виде граничного условия и в виде объемного источника. Условие Стефана и способы решения задачи Стефана.

#### 3. Концепции Эйлера и Лагранжа для моделирования тепломассообмена в жидкой ванне при сварке, плавке, сварке и наплавке

3.1. Сравнение подходов Эйлера и Лагранжа к описанию процессов переноса в жидких и газообразных средах. Уравнения Навье-Стокса. Формулировка уравнений при использовании подхода Эйлера.

Понятие о вязкой несжимаемой (слабосжимаемой) жидкости. Система уравнений Навье-Стокса. Уравнение неразрывности, уравнение движения и уравнение энергии. Материальная производная. .. Подход Эйлера и подход Лагранжа. Физический смысл конвективных (адвективных) слагаемых в уравнениях переноса при использовании подхода Эйлера. Подход Лагранжа. Сравнение постановок задачи расчета тепломассообмена в вязкой несжимаемой жидкости при использовании подходов Эйлера и Лагранжа. Программное обеспечение для инженерных расчетов, использующее подходы Эйлера и Лагранжа.

#### 4. Подход Эйлера: алгоритм SIMPLE и методы аппроксимации свободной поверхности жидкой ванны для моделирования процессов сварки, плавки, пайки и наплавки

4.1. Подход Эйлера: алгоритм SIMPLE. Метод "линии тока - завихренность" для решения двумерных задач тепломассообмена в слабосжимаемых средах. Методы аппроксимации свободной поверхности жидкой ванны для моделирования процессов сварки, плавки, пайки и наплавки

Метод «предиктор-корректор» (алгоритм SIMPLE) для численного решения уравнения движения вязкой несжимаемой жидкости. Суть алгоритма, вывод уравнения Пуассона для расчета поля давления, удовлетворяющего условию непрерывности. Конечно-разностная аппроксимация уравнений Навье-Стокса при использовании подхода Эйлера. Необходимость применения шахматной сетки.. Особенности постановки задачи. Переход к представлению "линии тока - завихренность" и вывод уравнений движения и теплообмена. Программная реализация метода.. Методы моделирования движения свободной поверхности: метод маркеров в ячейках (Marked and cell, MAC) и объема жидкости (Volume of fluid, VOF). Особенности представления свободной поверхности при необходимости пространственной дискретизации среди. Методы вычисления кривизны поверхности. Расчет сил поверхностного натяжения. Сведение поверхностных сил к объемным..

#### 5. Подход Лагранжа: SPH-методы для изучения тепломассопереноса при сварке, плавке, сварке и наплавке

5.1. Методы крупных частиц. Сравнение метода дискретных частиц и метода сглаженных частиц. Концепция метода гидродинамики сглаженных частиц.

Достоинства применения Лагранжевых координат в гидродинамике. Основы метода крупных частиц и области его применения. Недостатки концепции для дискретного представления частиц и необходимость их "сглаженного" представления для решения задач гидродинамики.. Формулировка уравнений Навье-Стокса при использовании концепции SPH. Перспективы метода..

#### 6. Комплексные модели сварочных процессов производства энергетического оборудования

6.1. Общий подход к разработке комплексных моделей. Смешанные модели. Моделирование процессов испарения. Нелинейные задачи, возникающие при моделировании сварочных процессов

Понятие мультифизической модели. Метод Монте-Карло для моделирования процесса взаимодействия электронных пучков с материалами при сварке.. Совместное использование Эйлеровых и Лагранжевых координат.. Уравнение Антуана. Критерии выбора уравнения состояния. Особенности моделирования процесса испарения в условиях технического вакуума.. Учет температурных зависимостей теплофизических свойств. Особенности решения задачи Стефана для чистых металлов и сплавов. Эффект Марангони..

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

1. Deskриптивные, нормативные и оптимизационные модели в теории сварочных процессов (2 часа).;
2. Эллиптические, параболические и гиперболические дифференциальные уравнения в физике (2 часа).;
3. Основы метода конечных разностей и метода контрольных объемов (2 часа).;
4. Методы решения многомерных задач теплопроводности: метод Эйлера, метод переменных направлений, метод drobных шагов (2 часа).;

5. Методы задания граничных условий при использовании явной и неявной разностных схем. Методы решения задачи Стефана (2 часа).;
6. Моделирование сварочных источников теплоты (2 часа).;
7. Уравнения Навье-Стокса. Подход Эйлера. Конвективная производная. (2 часа).;
8. Уравнения Навье-Стокса. Подход Лагранжа (2 часа).;
9. Конечно-разностная аппроксимация уравнений Навье-Стокса при использовании подхода Эйлера. Необходимость применения шахматной сетки (2 часа).;
10. Алгоритм SIMPLE C. Патанкара и его применение в современных вычислительных пакетах. Суть алгоритма, вывод уравнения Пуассона для расчета поля давления, удовлетворяющего условию непрерывности (2 часа).;
11. Разработка программы, реализующей алгоритм SIMPLE (2 часа).;
12. Методы моделирования свободной поверхности жидкости – MAC и VOF (2 часа).;
13. Методы крупных частиц в физике (2 часа).;
14. Метод гидродинамики сглаженных частиц и необходимость параллельных вычислений (2 часа).;
15. Концепция мультифизической модели. Смешанные модели. Совместное использование Эйлеровых и Лагранжевых координат. Метод Монте-Карло (2 часа).;
16. Моделирование процессов испарения. Нелинейные задачи. Эффект Марангони (2 часа)..

#### **3.4. Темы лабораторных работ** не предусмотрено

#### **3.5 Консультации**

#### **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	5	6	
<b>Знать:</b>								
алгоритмы численного решения многомерных задач нестационарного теплообмена при сварке, плавке, пайке и наплавке, на основе явной и неявной разностных схем	ИД-4ПК-1	+						Тестирование/Уравнение теплопроводности и его применение для моделирования процессов сварки, плавки, пайки и наплавки
методы численной интерпретации граничных условий и сварочных источников теплоты для различных видов сварки	ИД-4ПК-1		+					Тестирование/Граничные условия и сварочные источники теплоты
концепции Эйлера и Лагранжа для моделирования процессов переноса в жидких средах при сварке, плавке, пайке и наплавке	ИД-4ПК-1			+	+			Тестирование/Подходы Эйлера и Лагранжа для моделирования явлений переноса при сварке, плавке, пайке и наплавке
современные подходы к моделированию течения жидкой среды со свободной поверхностью при сварке, плавке, пайке и наплавке	ИД-4ПК-1						+	Тестирование/Метод гидродинамики сглаженных частиц для моделирования процессов сварки, плавки, пайки и наплавки
<b>Уметь:</b>								
применять полученные знания для самостоятельной разработки и алгоритмизации комплексных моделей сварочных процессов	ИД-4ПК-1						+	Программирование (код)/Разработка программы для моделирования процесса тепломассопереноса при сварке, плавке, пайке и наплавке для разработки технологий производства энергетического оборудования
разрабатывать алгоритмы численного решения системы уравнений Навье-Стокса для вязкой несжимаемой жидкости с	ИД-4ПК-1	+			+			Тестирование/Нелинейные явления и мультифизические модели сварочных процессов производства энергетического оборудования

использованием подхода Эйлера и метода контрольных объемов								
---	--	--	--	--	--	--	--	--

## **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: Компьютерное задание

1. Разработка программы для моделирования процесса тепломассопереноса при сварке, плавке, пайке и наплавке для разработки технологий производства энергетического оборудования (Программирование (код))

Форма реализации: Письменная работа

1. Граничные условия и сварочные источники теплоты (Тестирование)
2. Метод гидродинамики сглаженных частиц для моделирования процессов сварки, плавки, пайки и наплавки (Тестирование)
3. Нелинейные явления и мультифизические модели сварочных процессов производства энергетического оборудования (Тестирование)
4. Подходы Эйлера и Лагранжа для моделирования явлений переноса при сварке, плавке, пайке и наплавке (Тестирование)
5. Уравнение теплопроводности и его применение для моделирования процессов сварки, плавки, пайки и наплавки (Тестирование)

Балльно-рейтинговая структура дисциплины является приложением А.

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

#### Экзамен (Семестр №1)

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

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

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

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

1. Цирельман Н. М.- "Теория и прикладные задачи тепломассопереноса", (2-е изд., испр.), Издательство: "Лань", Санкт-Петербург, 2019 - (504 с.)  
<https://e.lanbook.com/book/119624>;
2. Д. В. Бисикало, А. Г. Жилкин, А. А. Боярчук- "Газодинамика тесных двойных звезд", Издательство: "Физматлит", Москва, 2013 - (632 с.)  
<https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=457644>;
3. Гантмахер В. Ф.- "Электроны в неупорядоченных средах", (3-е изд., испр. и доп.), Издательство: "ФИЗМАТЛИТ", Москва, 2013 - (288 с.)  
<https://e.lanbook.com/book/91178>;
4. Гладуш Г. Г., Смурув И. Ю.- "Физические основы лазерной обработки материалов", Издательство: "ФИЗМАТЛИТ", Москва, 2017 - (592 с.)  
<https://e.lanbook.com/book/105004>;
5. Патанкар, С. В. Численное решение задач теплопроводности и конвективного теплообмена при течении в каналах : пер. с англ. / С. В. Патанкар . – М. : Изд-во МЭИ, 2003 . – 312 с. - ISBN 5-7046-0898-1 .;

6. Зализняк, В. Е. Основы вычислительной физики: Ч.1. Введение в конечно-разностные методы / В. Е. Зализняк, Красноярский государственный университет . – М. : Ин-т компьютер. исслед., 2004 . – 252 с. + CD-ROM . - ISBN 5-939723-26-8 .;

7. Тепловые процессы обработки материалов концентрированными потоками энергии : учебное пособие по курсу "Теоретические основы сварки плавлением" по направлениям подготовки бакалавров 13.03.03 "Энергетическое машиностроение" и 15.03.01

"Машиностроение" / Р. В. Родякина, А. В. Щербаков, Д. А. Гапонова, М. А. Каримбеков, Нац. исслед. ун-т "МЭИ" (НИУ"МЭИ") . – М. : Изд-во МЭИ, 2019 . – 136 с. - ISBN 978-5-7046-2198-0 .

[http://elib.mpei.ru/action.php?kt\\_path\\_info=ktcore.SecViewPlugin.actions.document&fDocumentId=10976](http://elib.mpei.ru/action.php?kt_path_info=ktcore.SecViewPlugin.actions.document&fDocumentId=10976).

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

1. СДО "Прометей";
2. Office;
3. Windows;
4. Майнд Видеоконференции;
5. Visual Studio;
6. Dev-C++.

## **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. Научная электронная библиотека - <https://elibrary.ru/>
4. Национальная электронная библиотека - <https://rusneb.ru/>
5. ЭБС "Консультант студента" - <http://www.studentlibrary.ru/>
6. Электронная библиотека МЭИ (ЭБ МЭИ) - <http://elib.mpei.ru/login.php>
7. Портал открытых данных Российской Федерации - <https://data.gov.ru>
8. База открытых данных Министерства труда и социальной защиты РФ - <https://rosmintrud.ru/opendata>
9. База открытых данных профессиональных стандартов Министерства труда и социальной защиты РФ - <http://profstandart.rosmintrud.ru/obshchiy-informatsionnyy-blok/natsionalnyy-reestr-professionalnykh-standartov/>
10. База открытых данных Министерства экономического развития РФ - <http://www.economy.gov.ru>
11. База открытых данных Росфинмониторинга - <http://www.fedsfm.ru/opendata>
12. Электронная открытая база данных "Polpred.com Обзор СМИ" - <https://www.polpred.com>
13. Информационно-справочная система «Кодекс/Техэксперт» - <Http://proinfosoft.ru;http://docs.cntd.ru/>
14. Национальный портал онлайн обучения «Открытое образование» - <https://openedu.ru>
15. Официальный сайт Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии - <http://protect.gost.ru/>
16. Открытая университетская информационная система «РОССИЯ» - <https://uisrussia.msu.ru>
17. Официальный сайт Министерства науки и высшего образования Российской Федерации - <https://minobrnauki.gov.ru>
18. Официальный сайт Федеральной службы по надзору в сфере образования и науки - <https://obrnadzor>

### 6. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Тип помещения	Номер аудитории, наименование	Оснащение
Учебные аудитории для проведения лекционных занятий и текущего контроля	Ж-120, Машинный зал ИВЦ	сервер, кондиционер
	Б-413, Учебная аудитория	стол преподавателя, стол, стул, доска меловая, мультимедийный проектор, экран, доска маркерная
Учебные аудитории для проведения практических занятий, КР и КП	Ж-120, Машинный зал ИВЦ	сервер, кондиционер
	Б-103, Учебная аудитория каф. "ТМ"	парта, стол преподавателя, стол компьютерный, стул, шкаф для документов, тумба, доска меловая, мультимедийный проектор, экран, компьютер персональный, кондиционер
Учебные аудитории для проведения промежуточной аттестации	Ж-120, Машинный зал ИВЦ	сервер, кондиционер
	Б-103, Учебная аудитория каф. "ТМ"	парта, стол преподавателя, стол компьютерный, стул, шкаф для документов, тумба, доска меловая, мультимедийный проектор, экран, компьютер персональный, кондиционер
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	А-206, Учебная аудитория каф. "ЭППЭ"	кресло рабочее, стол преподавателя, стол учебный, стул, мультимедийный проектор, экран, доска магнитная, оборудование учебное, компьютер персональный
	ЭППЭ-21, Аудитория 21	стол, стул, мультимедийный проектор, экран, доска маркерная
	ЭППЭ-22, Кабинет сотрудников	стол, стол для оргтехники, стул, шкаф для документов, шкаф для одежды, компьютерная сеть с выходом в Интернет, многофункциональный центр, компьютер персональный, принтер
	ЭППЭ-25, Аудитория	стол преподавателя, стол, стол для оргтехники, стул, доска интерактивная, компьютерная сеть с выходом в Интернет, колонки звуковые, мультимедийный проектор, экран, доска маркерная, компьютер персональный
	ЭППЭ-26, Аудитория	стол преподавателя, стол, стул, вешалка для одежды, компьютерная сеть с выходом в Интернет, мультимедийный проектор, экран, доска маркерная, компьютер персональный



Помещения для хранения оборудования и учебного инвентаря	А-219/а, Кабинет сотрудников каф. "ЭППЭ"	кресло рабочее, стол для работы с документами, шкаф для одежды, шкаф для хранения инвентаря, тумба
	А-217, Кабинет сотрудников каф. "ЭППЭ"	кресло рабочее, стеллаж, стул, шкаф для документов, шкаф для одежды, стол письменный, тумба, компьютерная сеть с выходом в Интернет, компьютер персональный

## БАЛЛЬНО-РЕЙТИНГОВАЯ СТРУКТУРА ДИСЦИПЛИНЫ

### Математическое моделирование сварочных процессов

(название дисциплины)

#### 1 семестр

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

- КМ-1 Уравнение теплопроводности и его применение для моделирования процессов сварки, плавки, пайки и наплавки (Тестирование)
- КМ-2 Граничные условия и сварочные источники теплоты (Тестирование)
- КМ-3 Подходы Эйлера и Лагранжа для моделирования явлений переноса при сварке, плавке, пайке и наплавке (Тестирование)
- КМ-4 Метод гидродинамики сглаженных частиц для моделирования процессов сварки, плавки, пайки и наплавки (Тестирование)
- КМ-5 Разработка программы для моделирования процесса тепломассопереноса при сварке, плавке, пайке и наплавке для разработки технологий производства энергетического оборудования (Программирование (код))
- КМ-6 Нелинейные явления и мультифизические модели сварочных процессов производства энергетического оборудования (Тестирование)

**Вид промежуточной аттестации – Экзамен.**

Номер раздела	Раздел дисциплины	Индекс КМ:	КМ-1	КМ-2	КМ-3	КМ-4	КМ-5	КМ-6
		Неделя КМ:	4	6	8	10	14	16
1	Цели и задачи математического моделирования. Численное решение нестационарного уравнения теплопроводности для моделирования процессов сварки, плавки, пайки и наплавки							
1.1	Цели и задачи математического моделирования процессов сварки, плавки, пайки и наплавки. Классификация дифференциальных уравнений с частными производными 2-го порядка. Уравнение теплопроводности.		+					+
2	Численная интерпретация граничных условий и сварочных источников теплоты. Алгоритмизация задач теплопереноса на основе использования метода контрольных объемов							
2.1	Численная интерпретация граничных условий и сварочных источников теплоты. Алгоритмизация задач теплопереноса на основе использования метода контрольных объемов			+				
3	Концепции Эйлера и Лагранжа для моделирования тепломассообмена в жидкой							

	ванне при сварке, плавке, сварке и наплавке						
3.1	Сравнение подходов Эйлера и Лагранжа к описанию процессов переноса в жидких и газообразных средах. Уравнения Навье-Стокса. Формулировка уравнений при использовании подхода Эйлера.			+			
4	Подход Эйлера: алгоритм SIMPLE и методы аппроксимации свободной поверхности жидкой ванны для моделирования процессов сварки, плавки, пайки и наплавки						
4.1	Подход Эйлера: алгоритм SIMPLE. Метод "линии тока - завихренность" для решения двумерных задач тепломассообмена в слабосжимаемых средах. Методы аппроксимации свободной поверхности жидкой ванны для моделирования процессов сварки, плавки, пайки и наплавки			+			+
5	Подход Лагранжа: SPH-методы для изучения тепломассопереноса при сварке, плавке, сварке и наплавке						
5.1	Методы крупных частиц. Сравнение метода дискретных частиц и метода сглаженных частиц. Концепция метода гидродинамики сглаженных частиц.				+		
6	Комплексные модели сварочных процессов производства энергетического оборудования						
6.1	Общий подход к разработке комплексных моделей. Смешанные модели. Моделирование процессов испарения. Нелинейные задачи, возникающие при моделировании сварочных процессов					+	
Вес КМ, %:		10	10	10	10	50	10