

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

---

Направление подготовки/специальность: 14.04.01 Ядерная энергетика и теплофизика

Наименование образовательной программы: Теплофизика и молекулярная физика

Уровень образования: высшее образование - магистратура

Форма обучения: Очная

**Рабочая программа дисциплины**  
**КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ И**  
**ТЕПЛОФИЗИКЕ**

Блок:	Блок 1 «Дисциплины (модули)»
Часть образовательной программы:	Обязательная
№ дисциплины по учебному плану:	Б1.О.05
Трудоемкость в зачетных единицах:	1 семестр - 4;
Часов (всего) по учебному плану:	144 часа
Лекции	1 семестр - 32 часа;
Практические занятия	1 семестр - 32 часа;
Лабораторные работы	не предусмотрено учебным планом
Консультации	проводится в рамках часов аудиторных занятий
Самостоятельная работа	1 семестр - 79,7 часа;
в том числе на КП/КР	не предусмотрено учебным планом
Иная контактная работа	проводится в рамках часов аудиторных занятий
включая: Контрольная работа Расчетно-графическая работа	
Промежуточная аттестация:	
Зачет с оценкой	1 семестр - 0,3 часа;

**Москва 2024**

**ПРОГРАММУ СОСТАВИЛ:**

Преподаватель

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Яньков Г.Г.
	Идентификатор	Rbb1f0c84-YankovGG-11a2e4dc

Г.Г. Яньков

**СОГЛАСОВАНО:**

Руководитель  
образовательной программы

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Яньков Г.Г.
	Идентификатор	Rbb1f0c84-YankovGG-11a2e4dc

Г.Г. Яньков

Заведующий выпускающей  
кафедрой

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Герасимов Д.Н.
	Идентификатор	Ra5495398-GerasimovDN-6b58615

Д.Н. Герасимов

## 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

**Цель освоения дисциплины:** Цель освоения дисциплины состоит в изучении методов математического и численного моделирования сложных процессов тепло- и массообмена в разнообразных конструкциях.

### Задачи дисциплины

- закрепление понимания содержания законов сохранения массы, импульса, энергии и массы отдельного компонента в движущейся многокомпонентной сплошной среде, как частных случаев закона сохранения в обобщенной форме;
- закрепление понимания содержания законов сохранения массы, импульса, энергии и массы отдельного компонента в движущейся многокомпонентной сплошной среде, как частных случаев закона сохранения в обобщенной форме;
- детальное освоение численного метода контрольного объема, обеспечивающего безусловное выполнение интегральных законов сохранения для любого, выделенного в пространстве, контрольного объема;
- освоение обучающимися современных методов решения систем нелинейных алгебраических уравнений — дискретных аналогов исходных дифференциальных уравнений, выражающих законы сохранения;
- приобретение обучающимися навыков использования современных алгоритмов для расчета полей скорости и давления;
- освоение обучающимися современных моделей турбулентности для инженерных расчетов гидродинамики и тепло- и массообмена в разнообразных конструкциях;
- приобретение обучающимися навыков доказательства достоверности полученных результатов, представления результатов с использованием современных компьютерных технологий.

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
ОПК-1 Способен формулировать цели и задачи исследования, выбирать критерии оценки, выявлять приоритеты решения задач	ИД-1 <sub>ОПК-1</sub> Способен к анализу комплексных проблем в области ядерной энергетики и теплофизики	знать: - иерархию математических моделей теплофизических процессов в ядерной энергетике, различающихся временными и пространственными масштабами, размерностью и уровнем детализации совокупности сопряженных процессов.  уметь: - формулировать цели и задачи исследования и обосновывать математическую постановку задачи.
ОПК-1 Способен формулировать цели и задачи исследования, выбирать критерии оценки, выявлять приоритеты решения задач	ИД-2 <sub>ОПК-1</sub> Способен к составлению алгоритмов для решения конкретных задач в области ядерной энергетики и теплофизики	знать: - эффективные алгоритмы для численного решения системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих течение одно- и двухфазной многокомпонентной среды и процессы тепло- и массообмена.

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции	Запланированные результаты обучения
		<p>уметь:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- использовать существующие и разрабатывать новые алгоритмы для решения конкретных задач в области ядерной энергетики и теплофизики.</li> </ul>
<p>ОПК-2 Способен применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы</p>	<p>ИД-1<sub>ОПК-2</sub> Применяет математический аппарат для решения теплофизических задач атомной энергетики</p>	<p>знать:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- методы дискретизации дифференциальных уравнений в частных производных гидродинамики и тепло- и массообмена.</li> </ul> <p>уметь:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- используя метод контрольного объема, составлять систему алгебраических уравнений, являющихся дискретными аналогами исходной системы дифференциальных уравнений гидродинамики и тепло- и массообмена.</li> </ul>
<p>ОПК-2 Способен применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы</p>	<p>ИД-2<sub>ОПК-2</sub> Применяет компьютерные технологии для решения теплофизических задач ядерной энергетики</p>	<p>знать:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- возможности, архитектуру, основное функциональное наполнение и принципы работы универсальных компьютерных кодов для решения теплофизических задач.</li> </ul> <p>уметь:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- применять открытый компьютерный код ANES для решения теплофизических задач ядерной энергетики.</li> </ul>
<p>ОПК-3 Способен оформлять результаты научно-исследовательской деятельности в виде статей, докладов, научных отчетов и презентаций с использованием систем компьютерной верстки и пакетов офисных программ</p>	<p>ИД-1<sub>ОПК-3</sub> Способен формулировать результаты научных исследований</p>	<p>знать:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- методы доказательства достоверности полученных результатов численных исследований теплофизических процессов (верификация моделей и алгоритмов, сеточная независимость результатов, сходимость итерационных процедур, сопоставление результатов с имеющимися в литературе данными и др.).</li> </ul> <p>уметь:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- доказывать достоверность полученных данных, формулировать результаты и разрабатывать практические рекомендации по их использованию.</li> </ul>
<p>ОПК-3 Способен оформлять результаты</p>	<p>ИД-2<sub>ОПК-3</sub> Применяет компьютерные технологии</p>	<p>знать:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- совокупность программного</li> </ul>

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции	Запланированные результаты обучения
научно-исследовательской деятельности в виде статей, докладов, научных отчетов и презентаций с использованием систем компьютерной верстки и пакетов офисных программ	для представления результатов научно-исследовательской деятельности	<p>обеспечения в составе Microsoft office, пакеты программ в составе кода ANES построения графиков, скалярных и векторных полей переменных для оформления результатов научно-исследовательской деятельности в виде статей, докладов, научных отчетов и презентаций.</p> <p>уметь:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- применять программное обеспечение в составе Microsoft office, пакеты программ в составе кода ANES построения графиков, скалярных и векторных полей переменных для представления результатов научно-исследовательской деятельности.</li> </ul>

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ ВО

Дисциплина относится к основной профессиональной образовательной программе Теплофизика и молекулярная физика (далее – ОПОП), направления подготовки 14.04.01 Ядерная энергетика и теплофизика, уровень образования: высшее образование - магистратура.

Требования к входным знаниям и умениям:

- знать терминологию в области гидродинамики и тепломассообмена
- знать основы векторного анализа
- знать основные уравнения механики сплошных сред (уравнения неразрывности, Навье-Стокса и энергии)
- знать основные безразмерные критерии в задачах гидродинамики и теплообмена
- уметь самостоятельно разбираться в различных формах уравнений механики сплошных сред
- уметь использовать стандартные программные средства для обработки результатов расчета и построения графической информации

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 4 зачетных единицы, 144 часа.

№ 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	Введение	2	1	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Введение" <b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [9], 19-54	
1.1	Введение	2		2	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
2	Математическое описание процессов теплообмена	12		2	-	2	-	-	-	-	-	-	8	-	<b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Математическое описание процессов теплообмена" <b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], 56-90 [2], 97-125 [9], 56-90
2.1	Математическое описание процессов теплообмена	12		2	-	2	-	-	-	-	-	-	8	-	
3	Краткая характеристика численных методов решения ОУП	6		2	-	2	-	-	-	-	-	-	2	-	<b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Краткая характеристика численных методов решения ОУП" <b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [3], 25-62
3.1	Краткая характеристика численных методов решения ОУП	6	2	-	2	-	-	-	-	-	-	2	-		
4	Получение дискретного аналога для ОУП методом	8	2	-	4	-	-	-	-	-	-	2	-	<b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу	

	контрольного объема													"Получение дискретного аналога для ОУП методом контрольного объема"
4.1	Получение дискретного аналога для ОУП методом контрольного объема	8	2	-	4	-	-	-	-	-	2	-	-	<b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [5], 3-24
5	Нестационарные задачи диффузии с произвольно изменяющимся коэффициентом диффузии	8	2	-	2	-	-	-	-	-	4	-	-	<b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Нестационарные задачи диффузии с произвольно изменяющимся коэффициентом диффузии"
5.1	Нестационарные задачи диффузии с произвольно изменяющимся коэффициентом диффузии	8	2	-	2	-	-	-	-	-	4	-	-	<b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [3], 63-96 [6], 3-27
6	Нестационарные задачи конвекции и диффузии при заданном поле скорости	4	2	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	<b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Нестационарные задачи конвекции и диффузии при заданном поле скорости"
6.1	Нестационарные задачи конвекции и диффузии при заданном поле скорости	4	2	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	<b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [6], 27-34
7	Методы расчета поля скорости	8	4	-	2	-	-	-	-	-	2	-	-	<b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Методы расчета поля скорости"
7.1	Методы расчета поля скорости	8	4	-	2	-	-	-	-	-	2	-	-	<b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [3], 97-151 [6], 34-44
8	Методы решения систем уравнений — дискретных аналогов исходных	22	2	-	2	-	-	-	-	-	18	-	-	<b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Методы решения систем уравнений —"

	дифференциальных уравнений. Доказательства достоверности полученных результатов												дискретных аналогов исходных дифференциальных уравнений. Доказательства достоверности полученных результатов" <b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b>
8.1	Методы решения систем уравнений — дискретных аналогов исходных дифференциальных уравнений. Доказательства достоверности полученных результатов	22	2	-	2	-	-	-	-	-	18	-	[4], 202-258 [6], 17-21
9	Построение расчетной сетки для описания геометрически сложных объектов в расчетной области	18	2	-	4	-	-	-	-	-	12	-	<b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Построение расчетной сетки для описания геометрически сложных объектов в расчетной области"
9.1	Построение расчетной сетки для описания геометрически сложных объектов в расчетной области. Задание граничных условий, коэффициентов ОУП и источниковых членов. Средства обработки результатов расчетов	18	2	-	4	-	-	-	-	-	12	-	<b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [3], 138
10	Турбулентные течения	14	4	-	4	-	-	-	-	-	6	-	<b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Турбулентные течения"
10.1	Турбулентные течения	14	4	-	4	-	-	-	-	-	6	-	<b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b>



													[1], 140-176 [2], 181-216 [7], 500-535 [9], 140-176
11	Математические модели для турбулентной вязкости	14	4	-	6	-	-	-	-	-	4	-	<b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Математические модели для турбулентной вязкости"
11.1	Математические модели для турбулентной вязкости	14	4	-	6	-	-	-	-	-	4	-	<b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [7], 536-562 [8], 3-33
12	Модели для рейнольдсовых напряжений и компонент вектора плотности турбулентного потока теплоты и массы компонента смеси	10	4	-	2	-	-	-	-	-	4	-	<b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Модели для рейнольдсовых напряжений и компонент вектора плотности турбулентного потока теплоты и массы компонента смеси"
12.1	Модели для рейнольдсовых напряжений и компонент вектора плотности турбулентного потока теплоты и массы компонента смеси	10	4	-	2	-	-	-	-	-	4	-	<b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [7], 649-673 [8], 126-132
	Зачет с оценкой	18.0	-	-	-	-	-	-	-	0.3	-	17.7	
	Всего за семестр	144.0	32	-	32	-	-	-	-	0.3	62	17.7	
	Итого за семестр	144.0	32	-	32	-	-	-	-	0.3	79.7		

**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. Введение

#### 1.1. Введение

Содержание дисциплины. Примеры использования методов численного моделирования для решения разнообразных задач тепломассообмена, применительно к энергетике, авиационной и ракетно-космической технике, химической промышленности, медицине, экологическим проблемам воздушного и водного бассейнов и др..

### 2. Математическое описание процессов тепломассообмена

#### 2.1. Математическое описание процессов тепломассообмена

Законы сохранения массы, импульса, энергии, массы компонента в смеси как частные случаи общего закона сохранения. Обобщенное уравнение переноса (ОУП), выражающее закон сохранения в дифференциальной форме. Физический смысл отдельных членов ОУП. Особенности системы уравнений Навье-Стокса, записанной в естественных переменных, с позиций их численного решения. Решение уравнений гидродинамики в переменных «завихренность — функция тока». Получение уравнения Пуассона для давления. Преимущества и недостатки численного решения уравнений гидродинамики, записанных относительно различных переменных..

### 3. Краткая характеристика численных методов решения ОУП

#### 3.1. Краткая характеристика численных методов решения ОУП

Методы конечных разностей, взвешенных невязок, вариационный метод. Физический смысл и достоинства консервативного метода контрольного объема (МКО) как частного случая метода взвешенных невязок..

### 4. Получение дискретного аналога для ОУП методом контрольного объема

#### 4.1. Получение дискретного аналога для ОУП методом контрольного объема

Дискретизация пространства и времени. Методы построения расчетной сетки. Узловые точки и грани контрольных объемов (КО). Интегрирование ОУП по КО и интервалу времени. Выбор базисных (интерполяционных) функций. Явные и неявные схемы. Линеаризация источникового члена ОУП. Влияние способа линеаризации на устойчивость численного решения. Физический смысл обратной отрицательной связи. Проблема аппроксимации компонент вектора плотности полного потока соответствующего удельного свойства на гранях КО..

### 5. Нестационарные задачи диффузии с произвольно изменяющимся коэффициентом диффузии

#### 5.1. Нестационарные задачи диффузии с произвольно изменяющимся коэффициентом диффузии

Решение ОУП с разрывными коэффициентами для одномерной стационарной задачи диффузии. Эффективный коэффициент диффузии. Локально-одномерные аппроксимации для компонент вектора диффузионного потока в многомерных задачах. Правила построения дискретного аналога. Дискретный аналог ОУП для задачи диффузии. Условия устойчивости явной схемы и схемы Кранка-Николсона. Дискретные аналоги краевых условий. Методы решения систем нелинейных алгебраических уравнений высокого порядка..

## 6. Нестационарные задачи конвекции и диффузии при заданном поле скорости

### 6.1. Нестационарные задачи конвекции и диффузии при заданном поле скорости

Центрально-разностная схема и схема с разностями «против потока» для аппроксимации компонент вектора полного потока на гранях КО. Решение ОУП с разрывными коэффициентами для одномерной стационарной задачи конвекции и диффузии. Устойчивость численных схем. Локально-одномерные аппроксимации для компонент вектора полного потока в многомерных задачах. Дискретный аналог ОУП для задач конвекции и диффузии..

## 7. Методы расчета поля скорости

### 7.1. Методы расчета поля скорости

Алгоритм SIMPLE. Уравнение для поправки давления. Краевые условия для поправки давления. «Мягкие» выходные условия. Особенности алгоритмов SIMPLER, SIMPLEC, PISO. Метод нижней релаксации для получения сходящегося решения. Схемная диффузия. Причины возникновения схемной диффузии. Методы подавления схемной диффузии. Методы решения сопряженных задач тепломассообмена в областях сложной геометрической формы. Метод заблокированных контрольных объемов. Аналогия между итерационным методом и методом установления при решении стационарных задач гидродинамики и тепломассообмена..

## 8. Методы решения систем уравнений — дискретных аналогов исходных дифференциальных уравнений. Доказательства достоверности полученных результатов

8.1. Методы решения систем уравнений — дискретных аналогов исходных дифференциальных уравнений. Доказательства достоверности полученных результатов

Метод поправки и отложенной коррекции. Линейные «солверы» при структурном хранении сеточных переменных. Линейные «солверы» при неструктурном хранении. Параллельные вычисления. Методы распараллеливания. Декомпозиция расчетной области. Инструменты для параллельного программирования OpenMP и MPI. Методы доказательства достоверности полученных результатов: верификация моделей и алгоритмов, сеточная независимость результатов, сходимость итерационных процедур, сопоставление результатов с имеющимися в литературе данными и др..

## 9. Построение расчетной сетки для описания геометрически сложных объектов в расчетной области

9.1. Построение расчетной сетки для описания геометрически сложных объектов в расчетной области. Задание граничных условий, коэффициентов ОУП и источниковых членов. Средства обработки результатов расчетов

Криволинейные системы координат. Многоблочные сетки. Адаптивные сетки. Полностью неструктурные сетки. Дробные КО. Генератор сеток кода ANES. Задание граничных условий, коэффициентов решаемых уравнений сохранения, и источниковых членов в коде ANES. Программные средства для построения графиков, скалярных и векторных полей искомым переменных в коде ANES..

## 10. Турбулентные течения

### 10.1. Турбулентные течения

Краткий обзор экспериментальных данных о структуре турбулентных течений. Пристеночная турбулентность. Проблемы численного моделирования турбулентности. Методы прямого моделирования турбулентных течений (DNS). Моделирование крупных вихрей (LES). Классификация математических моделей турбулентности. Алгебраические, одно- и многопараметрические модели турбулентности..

### 11. Математические модели для турбулентной вязкости

#### 11.1. Математические модели для турбулентной вязкости

Стандартная диссипативная  $k$ - $\epsilon$  модель турбулентности для высоких турбулентных чисел Рейнольдса. Метод пристеночных функций. Современные  $k$ - $\epsilon$  модели для низких турбулентных чисел Рейнольдса. Модели турбулентности, реализованные в коде ANES..

### 12. Модели для рейнольдсовых напряжений и компонент вектора плотности турбулентного потока теплоты и массы компонента смеси

#### 12.1. Модели для рейнольдсовых напряжений и компонент вектора плотности турбулентного потока теплоты и массы компонента смеси

Дифференциальные модели. Аппроксимация диффузионных и источниковых членов. Алгебраические модели Лондера..

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

1. Получение выражений для среднеквадратических пульсаций скорости и компонент тензора напряжений Рейнольдса в приближении пограничного слоя на основе алгебраической модели Лондера для турбулентных напряжений (2 часа).;
2. Примеры расчета коэффициентов дискретного аналога для уравнения сохранения импульса с использованием “шахматной” сетки. Интерполяция поля скорости. Выявление области устойчивости центрально-разностной схемы. (4 часа);
3. Примеры расчета коэффициентов дискретного аналога для одномерной задачи конвекции и диффузии при заданном профиле скорости с использованием различных схем:
  - экспоненциальной;
  - центрально-разностной;
  - с разностями против потока;
  - Леонарда (4 часа);
4. Расчет коэффициентов дискретного аналогов и применение метода прогонки к одномерной задаче диффузии (2 часа);
5. Вывод дискретного аналога для уравнения диффузии в общем виде. Явные и неявные схемы. Абсолютно неявная схема, схема Кранка-Николсона. Анализ устойчивости явных и неявных схем на основе анализа знаков коэффициентов в дискретном аналоге (4 часа);
6. Получение эффективного коэффициента теплопроводности для стационарной одномерной постановки задачи теплопроводности без внутренних источников теплоты для стержня, состоящего из двух соприкасающихся материалов. Анализ предельных случаев. Учет контактного сопротивления при переносе тепла. Обобщение на случай других задач, описываемых обобщенным уравнением диффузии. Анализ консервативности используемых схем дискретизации. (2 часа);
7. Интегрирование дифференциального уравнения сохранения по контрольному объему. Применения кусочно-гладких интерполяционных функций для аппроксимации интегралов. Различные варианты линеаризации источников члена в ОУП (2 часа);
8. Конечно-разностные аппроксимации производных: односторонние и центральные

разности; аппроксимация второй производной; разности высокого порядка точности; погрешности аппроксимации (2 часа);

9. Вывод дискретных аналогов краевых условий для задач диффузии при различных способах построения сетки контрольных объемов (КО).

Приемы адаптации краевых условий смешанного типа (условий 3-го рода) для случая заданной на границе искомой функции (условий 1 рода) или плотности диффузионного потока (2-рода). Задание поверхностной плотности диффузионного потока через эквивалентный объемный источник в приграничном КО. (2 часа);

10. На основе уравнений гидродинамики в приближении постоянства физических свойств среды

— получение дифференциального уравнения для завихренности. Анализ этого уравнения для двумерной постановки задачи;

— получение дифференциального уравнения для функции тока при двумерной постановке задачи. Связь функции тока с векторным потенциалом. Граничные условия для функции тока на твердой непроницаемой стенке;

— получение дифференциального уравнения для давления. (4 часа);

11. Получение дифференциальных уравнений сохранения массы, импульса, энергии, массы компонента бинарной смеси на основе общего интегрального закона сохранения. Преобразование уравнений к дивергентной форме. Анализ частных случаев (стационарная постановка задачи, несжимаемость среды, неподвижность среды). Вывод уравнения энергии для различных искомых переменных (температуры, внутренней энергии, энтальпии среды) (4 часа).

### 3.4. Темы лабораторных работ

не предусмотрено

### 3.5 Консультации

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

1. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Введение"
2. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Математическое описание процессов теплообмена"
3. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Краткая характеристика численных методов решения ОУП"
4. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Получение дискретного аналога для ОУП методом контрольного объема"
5. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Нестационарные задачи диффузии с произвольно изменяющимся коэффициентом диффузии"
6. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Нестационарные задачи конвекции и диффузии при заданном поле скорости"
7. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Методы расчета поля скорости"
8. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Методы решения систем уравнений — дискретных аналогов исходных дифференциальных уравнений. Доказательства достоверности полученных результатов"
9. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Построение расчетной сетки для описания геометрически сложных объектов в расчетной области"
10. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Турбулентные течения"
11. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Математические модели для турбулентной вязкости"

12. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Модели для рейнольдсовых напряжений и компонент вектора плотности турбулентного потока теплоты и массы компонента смеси"

### **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	7	8	9	10	11	12		
<b>Знать:</b>															
иерархию математических моделей теплофизических процессов в ядерной энергетике, различающихся временными и пространственными масштабами, размерностью и уровнем детализации совокупности сопряженных процессов	ИД-1 <sub>ОПК-1</sub>	+	+												Контрольная работа/Математические модели процессов тепло- и массообмена  Контрольная работа/Модели турбулентности, реализованные в коде ANES
эффективные алгоритмы для численного решения системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих течение одно- и двухфазной многокомпонентной среды и процессы тепло- и массообмена	ИД-2 <sub>ОПК-1</sub>			+	+	+	+	+							Контрольная работа/Дискретный аналог уравнения конвекции и диффузии. Устойчивые и неустойчивые численные схемы. Алгоритмы поиска сопряженных полей скорости и давления. Методы решения систем нелинейных алгебраических уравнений
методы дискретизации дифференциальных уравнений в частных производных гидродинамики и тепло- и массообмена	ИД-1 <sub>ОПК-2</sub>			+	+	+	+								Контрольная работа/Дискретный аналог уравнения конвекции и диффузии. Устойчивые и неустойчивые численные схемы. Алгоритмы поиска сопряженных полей скорости и давления. Методы решения систем нелинейных алгебраических уравнений
возможности, архитектуру, основное функциональное наполнение и принципы работы универсальных компьютерных кодов для решения теплофизических задач	ИД-2 <sub>ОПК-2</sub>										+	+			Контрольная работа/Архитектура, функциональное наполнение, принципы работы кода ANES. Алгебраические и однопараметрические модели

														турбулентности Контрольная работа/Модели турбулентности, реализованные в коде ANES
методы доказательства достоверности полученных результатов численных исследований теплофизических процессов (верификация моделей и алгоритмов, сеточная независимость результатов, сходимість итерационных процедур, сопоставление результатов с имеющимися в литературе данными и др.)	ИД-1 <sub>ОПК-3</sub>								+	+				Контрольная работа/Архитектура, функциональное наполнение, принципы работы кода ANES. Алгебраические и однопараметрические модели турбулентности
совокупность программного обеспечения в составе Microsoft office, пакеты программ в составе кода ANES построения графиков, скалярных и векторных полей переменных для оформления результатов научно-исследовательской деятельности в виде статей, докладов, научных отчетов и презентаций	ИД-2 <sub>ОПК-3</sub>													Расчетно-графическая работа/Расчет полей скорости и температуры в устройстве заданной геометрической формы при заданных краевых и начальных условиях с помощью открытого компьютерного кода ANES
<b>Уметь:</b>														
формулировать цели и задачи исследования и обосновывать математическую постановку задачи	ИД-1 <sub>ОПК-1</sub>		+						+	+	+	+	+	Расчетно-графическая работа/Расчет полей скорости и температуры в устройстве заданной геометрической формы при заданных краевых и начальных условиях с помощью открытого компьютерного кода ANES
использовать существующие и разрабатывать новые алгоритмы для	ИД-2 <sub>ОПК-1</sub>								+	+				Расчетно-графическая работа/Расчет полей скорости и температуры в



решения конкретных задач в области ядерной энергетики и теплофизики														устройстве заданной геометрической формы при заданных краевых и начальных условиях с помощью открытого компьютерного кода ANES
используя метод контрольного объема, составлять систему алгебраических уравнений, являющихся дискретными аналогами исходной системы дифференциальных уравнений гидродинамики и тепло- и массообмена	ИД-1 <sub>ОПК-2</sub>				+	+	+	+						Контрольная работа/Дискретный аналог уравнения конвекции и диффузии. Устойчивые и неустойчивые численные схемы. Алгоритмы поиска сопряженных полей скорости и давления. Методы решения систем нелинейных алгебраических уравнений
применять открытый компьютерный код ANES для решения теплофизических задач ядерной энергетики	ИД-2 <sub>ОПК-2</sub>								+	+	+	+	+	Расчетно-графическая работа/Расчет полей скорости и температуры в устройстве заданной геометрической формы при заданных краевых и начальных условиях с помощью открытого компьютерного кода ANES
доказывать достоверность полученных данных, формулировать результаты и разрабатывать практические рекомендации по их использованию	ИД-1 <sub>ОПК-3</sub>								+	+				Расчетно-графическая работа/Расчет полей скорости и температуры в устройстве заданной геометрической формы при заданных краевых и начальных условиях с помощью открытого компьютерного кода ANES
применять программное обеспечение в составе Microsoft office, пакеты программ в составе кода ANES построения графиков, скалярных и векторных полей переменных для представления результатов научно-исследовательской деятельности	ИД-2 <sub>ОПК-3</sub>									+	+	+		Расчетно-графическая работа/Расчет полей скорости и температуры в устройстве заданной геометрической формы при заданных краевых и начальных условиях с помощью открытого компьютерного кода ANES

## **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. Архитектура, функциональное наполнение, принципы работы кода ANES. Алгебраические и однопараметрические модели турбулентности (Контрольная работа)
2. Дискретный аналог уравнения конвекции и диффузии. Устойчивые и неустойчивые численные схемы. Алгоритмы поиска сопряженных полей скорости и давления. Методы решения систем нелинейных алгебраических уравнений (Контрольная работа)
3. Математические модели процессов тепло- и массообмена (Контрольная работа)
4. Модели турбулентности, реализованные в коде ANES (Контрольная работа)

Форма реализации: Проверка задания

1. Расчет полей скорости и температуры в устройстве заданной геометрической формы при заданных краевых и начальных условиях с помощью открытого компьютерного кода ANES (Расчетно-графическая работа)

Балльно-рейтинговая структура дисциплины является приложением А.

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

*Зачет с оценкой (Семестр №1)*

Итоговая аттестация проводится по результатам работы в семестре.

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. Ягов, В. В. Теплообмен в однофазных средах и при фазовых превращениях : учебное пособие для вузов по направлению "Ядерная энергетика и теплофизика" / В. В. Ягов . – М. : Издательский дом МЭИ, 2014 . – 542 с. - ISBN 978-5-383-00854-6 .;
2. Теплообмен в ядерных энергетических установках : учебное пособие для вузов по специальностям "Теплофизика" и "Атомные электрические станции и установки" направления "Техническая физика" / Б. С. Петухов, Л. Г. Генин, С. А. Ковалев, и др. – 3-е изд., перераб. и доп . – М. : Изд-во МЭИ, 2003 . – 548 с. - ISBN 5-7046-0843-4 .;
3. Патанкар, С. В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости : пер. с англ. / С. В. Патанкар . – М. : Энергоатомиздат, 1984 . – 150 с.;
4. Амосов, А. А. Вычислительные методы : учебное пособие для вузов по специальности и направлению "Прикладная математика и информатика" / А. А. Амосов, Ю. А. Дубинский, Н. В. Копченова . – 3-е изд., перераб. и доп . – М. : Издательский дом МЭИ, 2008 . – 672 с. - ISBN 978-5-383-00302-2 .;
5. Лазарев, Д. О. Численное решение задач тепломассообмена, описываемых обобщенным уравнением диффузии : учебное пособие по курсу "Численное решение задач теплофизики" по направлению "Техническая физика" / Д. О. Лазарев, В. И. Мика, Г. Г. Яньков, Моск.

энерг. ин-т (МЭИ ТУ) . – М. : Издательский дом МЭИ, 2009 . – 24 с. - ISBN 978-5-383-00366-4 .

<http://elib.mpei.ru/elib/view.php?id=1459>;

6. Минко, К. Б. Численное решение задач гидродинамики и теплообмена : учебное пособие по курсу "Компьютерные технологии в науке и образовании" по направлению "Ядерная энергетика и теплофизика" / К. Б. Минко, Г. Г. Яньков, Нац. исслед. ун-т "МЭИ" . – М. : Издательский дом МЭИ, 2015 . – 44 с. - ISBN 978-5-383-00997-0 .;

7. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя : пер. с нем. / Г. Шлихтинг . – 5-е изд., испр . – М. : Наука, 1974 . – 712 с.;

8. Лапин, Ю. В. Внутренние течения газовых смесей / Ю. В. Лапин, М. Х. Стрелец . – М. : Наука, 1989 . – 366 с.;

9. Ягов В.В.- "Теплообмен в однофазных средах и при фазовых превращениях", Издательство: "МЭИ", Москва, 2019

<https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785383012451.html>.

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

1. Office / Российский пакет офисных программ;
2. ANES;
3. ParaView.

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

## **6. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

<b>Тип помещения</b>	<b>Номер аудитории, наименование</b>	<b>Оснащение</b>
Учебные аудитории для проведения лекционных занятий и текущего контроля	Ж-120, Машинный зал ИВЦ	сервер, кондиционер
	Т-412, Учебная лаборатория вычислительной техники	стол преподавателя, стол учебный, стул, компьютерная сеть с выходом в Интернет, доска маркерная, компьютер персональный
Учебные аудитории для проведения практических занятий, КР и КП	Т-417, Учебная аудитория	стол преподавателя, стол учебный, стул, шкаф, компьютерная сеть с выходом в Интернет, мультимедийный проектор, доска маркерная, компьютер персональный
Учебные аудитории для проведения промежуточной аттестации	Т-209, Учебная аудитория	стол преподавателя, стол учебный, стул, шкаф, вешалка для одежды, компьютерная сеть с выходом в Интернет, экран интерактивный, мультимедийный проектор, доска маркерная, компьютер персональный
Помещения для самостоятельной работы	Т-412, Учебная лаборатория вычислительной	стол преподавателя, стол учебный, стул, компьютерная сеть с выходом в Интернет, доска маркерная, компьютер

	техники	персональный
Помещения для консультирования	Т-205, Учебная аудитория	стол преподавателя, стол учебный, стул, шкаф, доска маркерная
Помещения для хранения оборудования и учебного инвентаря	Т-213, Подсобное помещение	

## БАЛЛЬНО-РЕЙТИНГОВАЯ СТРУКТУРА ДИСЦИПЛИНЫ

### Компьютерные технологии в ядерной энергетике и теплофизике

(название дисциплины)

#### 1 семестр

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

- КМ-1 Математические модели процессов тепло- и массообмена (Контрольная работа)
- КМ-2 Дискретный аналог уравнения конвекции и диффузии. Устойчивые и неустойчивые численные схемы. Алгоритмы поиска сопряженных полей скорости и давления. Методы решения систем нелинейных алгебраических уравнений (Контрольная работа)
- КМ-3 Архитектура, функциональное наполнение, принципы работы кода ANES. Алгебраические и однопараметрические модели турбулентности (Контрольная работа)
- КМ-4 Расчет полей скорости и температуры в устройстве заданной геометрической формы при заданных краевых и начальных условиях с помощью открытого компьютерного кода ANES (Расчетно-графическая работа)
- КМ-5 Модели турбулентности, реализованные в коде ANES (Контрольная работа)

**Вид промежуточной аттестации – Зачет с оценкой.**

Номер раздела	Раздел дисциплины	Индекс КМ:	КМ-1	КМ-2	КМ-3	КМ-4	КМ-5
		Неделя КМ:	4	8	12	14	16
1	Введение						
1.1	Введение		+				+
2	Математическое описание процессов теплообмена						
2.1	Математическое описание процессов теплообмена		+			+	+
3	Краткая характеристика численных методов решения ОУП						
3.1	Краткая характеристика численных методов решения ОУП			+			
4	Получение дискретного аналога для ОУП методом контрольного объема						
4.1	Получение дискретного аналога для ОУП методом контрольного объема			+			
5	Нестационарные задачи диффузии с произвольно изменяющимся коэффициентом диффузии						
5.1	Нестационарные задачи диффузии с произвольно изменяющимся коэффициентом диффузии			+			
6	Нестационарные задачи конвекции и диффузии при заданном поле скорости						
6.1	Нестационарные задачи конвекции и диффузии при заданном поле скорости			+		+	

7	Методы расчета поля скорости					
7.1	Методы расчета поля скорости		+		+	
8	Методы решения систем уравнений — дискретных аналогов исходных дифференциальных уравнений. Доказательства достоверности полученных результатов					
8.1	Методы решения систем уравнений — дискретных аналогов исходных дифференциальных уравнений. Доказательства достоверности полученных результатов			+	+	
9	Построение расчетной сетки для описания геометрически сложных объектов в расчетной области					
9.1	Построение расчетной сетки для описания геометрически сложных объектов в расчетной области. Задание граничных условий, коэффициентов ОУП и источниковых членов. Средства обработки результатов расчетов			+	+	+
10	Турбулентные течения					
10.1	Турбулентные течения			+	+	+
11	Математические модели для турбулентной вязкости					
11.1	Математические модели для турбулентной вязкости				+	
12	Модели для рейнольдсовых напряжений и компонент вектора плотности турбулентного потока теплоты и массы компонента смеси					
12.1	Модели для рейнольдсовых напряжений и компонент вектора плотности турбулентного потока теплоты и массы компонента смеси				+	
Вес КМ, %:		20	20	20	20	20