

**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


**Оценочные материалы
по дисциплине
Термодинамика необратимых процессов**

**Москва
2023**

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ РАЗРАБОТАЛ:

Преподаватель

(должность)

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Захарова О.Д.
	Идентификатор	R53984920-ZakharovaOD-5e59536

(подпись)

О.Д.


Захарова

(расшифровка
подписи)

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель
образовательной
программы

(должность, ученая степень, ученое
звание)

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


(подпись)

Г.Г. Яньков

(расшифровка
подписи)

Заведующий
выпускающей кафедры

(должность, ученая степень, ученое
звание)

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

(подпись)

Д.Н.

Герасимов

(расшифровка
подписи)

ОБЩАЯ ЧАСТЬ

Оценочные материалы по дисциплине предназначены для оценки: достижения обучающимися запланированных результатов обучения по дисциплине, этапа формирования запланированных компетенций и уровня освоения дисциплины.

Оценочные материалы по дисциплине включают оценочные средства для проведения мероприятий текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации.

Формируемые у обучающегося компетенции:

1. ПК-1 Способен анализировать и моделировать физические процессы, используемые в атомной энергетике

ИД-1 Имеет навыки математического описания и моделирования процессов в рабочих телах и элементах энергетических установок

и включает:

для текущего контроля успеваемости:

Форма реализации: Письменная работа

1. Контрольный опрос № 2 "Первый закон термодинамики неравновесных систем" (Проверочная работа)

Форма реализации: Смешанная форма

1. Контрольный опрос № 3 "Второй закон термодинамики неравновесных систем" (Проверочная работа)

2. Контрольный опрос № 4 "Потоки и термодинамические силы" (Проверочная работа)

Форма реализации: Соблюдение графика выполнения задания

1. Контрольный опрос № 1 "Уравнения локального баланса" (Решение задач)

БРС дисциплины

3 семестр

Раздел дисциплины	Веса контрольных мероприятий, %				
	Индекс КМ:	КМ-1	КМ-2	КМ-3	КМ-4
	Срок КМ:	4	7	11	16
Полевое описание неравновесной сплошной среды. Термины и определения					
Термины и определения. Локальные и интегральные термодинамические функции. Уравнение локального баланса термодинамической величины. Уравнение интегрального баланса термодинамической величины	+				
Уравнения баланса массы, импульса, энергии многокомпонентной системы					
Уравнения баланса массы системы. Уравнения баланса масс компонентов системы. Уравнения баланса импульса системы. Уравнения баланса энергии системы. Полная, собственная и внутренняя энергии. Плотность потока собственной энергии, производство собственной энергии. Уравнение локального баланса собственной энергии в переменных Эйлера и Лагранжа.	+				

Уравнение локального баланса кинетической энергии движущейся среды. Уравнение локального баланса внутренней энергии.				
Первый закон термодинамики: локальная формулировка.				
Понятие локального термодинамического равновесия. Локальная удельная внутренняя энергия как функция состояния. Локальные формулировки первого закона термодинамики. Температура, термическое и калорическое уравнения состояния.		+		
Второй закон термодинамики: локальная формулировка.				
Энтропия и уравнение Гиббса. Производство энтропии и необратимость. Энтропия и уравнение Гиббса: локальная формулировка второго закона термодинамики. Уравнение локального баланса энтропии. Производство энтропии и необратимость. Плотность теплового потока. Возрастание локального производства энтропии в результате необратимых процессов, протекающих в системе.			+	
Первый закон термодинамики: интегральные формулировки.				
Интегральный баланс внутренней энергии. Интегральный баланс энтальпии. Интегральный баланс полной энтальпии.			+	
Второй закон термодинамики: интегральная формулировка.				
Интегральный баланс энтропии и закон возрастания энтропии.			+	
Потоки и термодинамические силы. Теорема Кюри. Соотношения взаимности Онзагера.				
Зависимость потоков от термодинамических сил. Линейная термодинамика необратимых процессов. Теорема Кюри. Применение теоремы Кюри к скалярным и векторным процессам переноса. Матрица кинетических коэффициентов. Соотношения взаимности Онзагера. Независимые потоки и термодинамические силы. Симметрия матрицы кинетических коэффициентов векторных процессов переноса.				+
Процессы переноса.				
Диффузия и теплопроводность во многокомпонентных смесях. Вязкость. Химические реакции. Диффузия и теплопроводность во многокомпонентных смесях. Явление термодиффузии. Диффузионный термоэффект. Эффект Зеебека. Эффект Пельтье. Обобщенный закон Фика. Обобщенный закон Ома. Вязкость. Три независимых составляющих вклада вязких напряжений в производство энтропии. Сдвиговая вязкость. Торсионная вязкость. Объемная вязкость. Обобщенный закон Ньютона. Вид тензоров теплопроводности и электропроводности в анизотропных средах. Доказательство симметричности тензоров теплопроводности и электропроводности. Химическая кинетика. Зависимость скорости реакции от сродства. Теплопроводность химически реагирующих систем.				+
Вес КМ:	25	15	25	35

\$Общая часть/Для промежуточной аттестации\$

СОДЕРЖАНИЕ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ

I. Оценочные средства для оценки запланированных результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с индикаторами достижения компетенций

Индекс компетенции	Индикатор	Запланированные результаты обучения по дисциплине	Контрольная точка
ПК-1	ИД-1 _{ПК-1} Имеет навыки математического описания и моделирования процессов в рабочих телах и элементах энергетических установок	<p>Знать:</p> <ul style="list-style-type: none"> пределы применимости классических уравнений тепловых и гидродинамических процессов основные аналитические методы исследования сложных физических процессов законы классического описания неравновесных систем <p>Уметь:</p> <ul style="list-style-type: none"> использовать современные математические методы для описания задач гидродинамики и теплообмена 	<p>Контрольный опрос № 1 "Уравнения локального баланса" (Решение задач)</p> <p>Контрольный опрос № 2 "Первый закон термодинамики неравновесных систем" (Проверочная работа)</p> <p>Контрольный опрос № 3 "Второй закон термодинамики неравновесных систем" (Проверочная работа)</p> <p>Контрольный опрос № 4 "Потоки и термодинамические силы" (Проверочная работа)</p>

II. Содержание оценочных средств. Шкала и критерии оценивания

КМ-1. Контрольный опрос № 1 "Уравнения локального баланса"

Формы реализации: Соблюдение графика выполнения задания

Тип контрольного мероприятия: Решение задач

Вес контрольного мероприятия в БРС: 25

Процедура проведения контрольного мероприятия: Решение задач по теме опроса.

Краткое содержание задания:

Задача №1. Выведите формулу, связывающую скорость изменения объёма системы с полем локальной скорости смещения границы объёма.

Задача №2. Используя результат решения **Задачи №1**, выведите уравнение интегрального баланса физической величины (термодинамической функции), если объём системы меняется с течением времени.

Задача №3. Докажите, что при выводе уравнения локального баланса массы химически реагирующей системы путём почленного суммирования уравнений локального баланса масс компонентов локальное производство массы системы за счёт протекания неравновесных химических реакций оказывается равным нулю.

Задача №4. Выведите уравнение локального баланса внутренней энергии неравновесной смеси веществ в переменных Эйлера и Лагранжа из уравнения локального баланса собственной энергии.

Задача №5. Выведите уравнение локального баланса энтальпии неравновесной смеси веществ из уравнения локального баланса внутренней энергии.

Контрольные вопросы/задания:

<p>Уметь: использовать современные математические методы для описания задач гидродинамики и теплообмена</p>	<ol style="list-style-type: none">1.1. Локальные и интегральные термодинамические функции.2. Уравнение локального баланса термодинамической величины.3. Уравнение интегрального баланса термодинамической величины.4. Локальная скорость среды и плотность потока массы.5. Баланс массы элемента объёма среды.6. Интегральный баланс массы системы.7. Локальный баланс массы и производство веществ в химически реагирующей смеси.8. Интегральный баланс массы компонента смеси.9. Уравнения баланса импульса движущейся сплошной среды.10. Производство собственной энергии.11. Уравнение локального баланса собственной энергии в переменных Эйлера и Лагранжа.12. Уравнение локального баланса внутренней энергии
---	---

Описание шкалы оценивания:

Оценка: 5

Нижний порог выполнения задания в процентах: 70

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "отлично" выставляется если задание выполнено в полном объеме или выполнено преимущественно верно

Оценка: 4

Нижний порог выполнения задания в процентах: 60

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "хорошо" выставляется если большинство вопросов раскрыто. выбрано верное направление для решения задач

Оценка: 3

Нижний порог выполнения задания в процентах: 50

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "удовлетворительно" выставляется если задание преимущественно выполнено

КМ-2. Контрольный опрос № 2 "Первый закон термодинамики неравновесных систем"

Формы реализации: Письменная работа

Тип контрольного мероприятия: Проверочная работа

Вес контрольного мероприятия в БРС: 15

Процедура проведения контрольного мероприятия: Ответы на вопросы по теме контрольного опроса

Краткое содержание задания:

Ответить на вопросы, приведенные в тексте учебного пособия в разделе "Вопросы для самопроверки"

Контрольные вопросы/задания:

Знать: пределы применимости классических уравнений тепловых и гидродинамических процессов	1.1. Какова математическая формулировка Первого закона термодинамики для неравновесной системы, которая описывается в рамках модели пространственно неоднородной и, возможно, нестационарной сплошной среды? Каковы равноценные модификации этой формулировки? 2. Что такое термическое уравнение состояния вещества? Какова его локальная формулировка? Является ли это уравнение логическим следствием первого закона термодинамики? 3. Что такое калорическое уравнение состояния вещества? Является ли это уравнение логическим следствием первого закона термодинамики? Можно ли утверждать, что первый закон термодинамики и есть утверждение о существовании калорического уравнения состояния вещества?
---	---

Описание шкалы оценивания:

Оценка: 5

Нижний порог выполнения задания в процентах: 70

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "отлично" выставляется если задание выполнено в полном объеме или выполнено преимущественно верно

Оценка: 4

Нижний порог выполнения задания в процентах: 60

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "хорошо" выставляется если большинство вопросов раскрыто. выбрано верное направление для решения задач

Оценка: 3

Нижний порог выполнения задания в процентах: 50

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "удовлетворительно" выставляется если задание преимущественно выполнено

КМ-3. Контрольный опрос № 3 "Второй закон термодинамики неравновесных систем"

Формы реализации: Смешанная форма

Тип контрольного мероприятия: Проверочная работа

Вес контрольного мероприятия в БРС: 25

Процедура проведения контрольного мероприятия: Решение задач, ответы на вопросы из раздела "вопросы для самопроверки"

Краткое содержание задания:

Задача №1. Выведите выражения для подсчёта членов уравнения локального баланса энтропии:

- 11.1. локальной плотности потока энтропии;
- 11.2. локального производства энтропии;
 - 11.2.1. вклада в производство энтропии от переноса тепла;
 - 11.2.2. от диффузии;
 - 11.2.3. от вязкого трения;
 - 11.2.4. от протекания неравновесных химических реакций.

Задача №2. Объясните, как выводится соотношение, связывающее плотность потока внутренней энергии с плотностью теплового потока.

Задача №3. Объясните, почему в «источниковом» члене уравнений локального баланса внутренней энергии и энтальпии неравновесной смеси химически реагирующих веществ отсутствует вклад «внутреннего источника тепла» за счёт выделения (поглощения) тепловых эффектов химических реакций.

Контрольные вопросы/задания:

Знать: законы классического описания неравновесных систем	<ol style="list-style-type: none">1.1. Какова локальная формулировка второго закона термодинамики для неравновесных систем?2. Какое известное термодинамическое соотношение положено в основу вывода уравнения локального баланса энтропии неравновесной системы и на каком основании?3. Как вывести уравнение локального баланса энтропии из уравнения Гиббса?4. Из каких вкладов складывается выражение для локального производства энтропии неравновесной системы?5. Как связано локальное производство энтропии с локальным производством внутренней энергии?6. Что такое потоки и термодинамические силы в термодинамике необратимых процессов? Как в этих
---	--

	<p>терминах записать общее выражение для локального производства энтропии?</p> <p>7. Перечислите взаимно сопряжённые потоки и термодинамические силы в неравновесной движущейся химически реагирующей смеси веществ.</p> <p>8. Почему локальное производство энтропии в целом и вклады в него от отдельных необратимых процессов неотрицательны?</p> <p>9. Как выглядит «потоковый» член уравнения локального баланса энтропии?</p> <p>10. Как связаны плотность потока энергии теплового движения молекул и плотность теплового потока и откуда это следует?</p>
--	---

Описание шкалы оценивания:

Оценка: 5

Нижний порог выполнения задания в процентах: 70

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "отлично" выставляется если задание выполнено в полном объеме или выполнено преимущественно верно

Оценка: 4

Нижний порог выполнения задания в процентах: 60

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "хорошо" выставляется если большинство вопросов раскрыто, выбрано верное направление для решения задач

Оценка: 3

Нижний порог выполнения задания в процентах: 50

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "удовлетворительно" выставляется если задание преимущественно выполнено

КМ-4. Контрольный опрос № 4 "Потоки и термодинамические силы"

Формы реализации: Смешанная форма

Тип контрольного мероприятия: Проверочная работа

Вес контрольного мероприятия в БРС: 35

Процедура проведения контрольного мероприятия: Решение задач, ответы на вопросы из раздела "вопросы для самопроверки"

Краткое содержание задания:

Задача №1. Используя соотношения симметрии Онзагера, выведите соотношение, связывающее коэффициенты Зеебека и Пельтье.

Контрольные вопросы/задания:

<p>Знать: основные аналитические методы исследования сложных физических процессов</p>	<p>1.1. Что такое «прямые» и «перекрёстные» необратимые процессы? Приведите примеры.</p> <p>2. Почему понятие «кинетический коэффициент» пригодно для описания только линейных процессов переноса?</p> <p>3. Как формулируется теорема П. Кюри и что подразумевается под «родственными» и «неродственными» потоками и термодинамическими силами?</p> <p>4. Почему кинетические коэффициенты в изотропной</p>
---	--

	<p>системе должны быть инвариантны по отношению к преобразованиям координат?</p> <p>5. Какие процессы переноса относятся к «скалярным», а какие — к «векторным»?</p> <p>6. Какие процессы диффузии в смеси веществ являются прямыми, а какие — перекрёстными?</p> <p>7. Почему электрический ток в проводнике является диффузионным процессом?</p> <p>8. При каких условиях коэффициенты переноса электрического тока и тепла в проводнике оказываются тензорами?</p> <p>9. Какие величины и как связывают соотношения взаимности Л. Онзагера?</p> <p>10. Чем и как отличаются соотношения взаимности Онзагера – Казимира от соотношений Онзагера? Приведите примеры, когда это отличие существенно.</p> <p>11. Какие условия на кинетические коэффициенты накладывает требование Второго закона термодинамики о неотрицательности локального производства энтропии?</p> <p>12. Какие условия на кинетические коэффициенты диффузионных процессов накладывает взаимозависимость диффузионных потоков? Как построить систему независимых уравнений диффузии?</p> <p>13. Как вывести соотношение взаимности между коэффициентами Зеебека и Пельтье?</p>
--	---

Описание шкалы оценивания:

Оценка: 5

Нижний порог выполнения задания в процентах: 70

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "отлично" выставляется если задание выполнено в полном объеме или выполнено преимущественно верно

Оценка: 4

Нижний порог выполнения задания в процентах: 60

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "хорошо" выставляется если большинство вопросов раскрыто. выбрано верное направление для решения задач

Оценка: 3

Нижний порог выполнения задания в процентах: 50

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "удовлетворительно" выставляется если задание преимущественно выполнено

СОДЕРЖАНИЕ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

3 семестр

Форма промежуточной аттестации: Зачет с оценкой

Пример билета

1. Уравнение локального баланса термодинамической величины.
2. Соотношения взаимности Онзагера – Казимира. Симметрия матрицы кинетических коэффициентов векторных необратимых процессов. Показать на примере термоэлектрических явлений в металлическом проводнике (эффекты Зеебека и Пельтье).

Процедура проведения

Письменная работа, обсуждение результатов.

1. Перечень компетенций/индикаторов и контрольных вопросов проверки результатов освоения дисциплины

1. Компетенция/Индикатор: ИД-1_{ПК-1} Имеет навыки математического описания и моделирования процессов в рабочих телах и элементах энергетических установок

Вопросы, задания

1. Баланс массы элемента объёма среды. Интегральный баланс массы системы.
2. Уравнения баланса импульса движущейся сплошной среды
3. Уравнение локального баланса собственной энергии в переменных Эйлера и Лагранжа
4. Уравнение локального баланса внутренней энергии
5. Уравнение локального баланса энтропии
6. Производство энтропии и необратимость
7. Теорема Кюри
8. Уравнение интегрального баланса термодинамической величины
9. Интегральный баланс массы компонента смеси
10. Вязкость: сдвиговая, объёмная, торсионная. Объяснить условия возникновения, используя теорему Кюри.
11. Симметрия матрицы кинетических коэффициентов векторных необратимых процессов.

Материалы для проверки остаточных знаний

1. Необратимый процесс диффузии возникает, если в системе существует
Ответы:
А. градиент скорости, Б. система находится в поле сил тяжести, В. градиент концентраций
Верный ответ: В. градиент концентраций
2. Необратимый процесс теплопроводности возникает, если в системе существует
Ответы:
А. градиент скорости, Б. протекают химические реакции, В. градиент температуры
Верный ответ: В. градиент температуры
3. В неидеальной вязкой жидкости касательные и нормальные напряжения, возникающие в потоке, определяются
Ответы:

А. градиентом проекций среднemasсовой скорости, Б. градиентом концентраций, В. градиентом проекций среднemasсовой скорости и градиентом температуры

Верный ответ: А. градиентом проекций среднemasсовой скорости

4. Процесс диффузии возникает в системе, в которой существуют

Ответы:

А. градиенты концентраций и температуры, Б. градиенты концентраций, температуры и давления, В. градиенты концентраций, температуры, давления, полей внешних сил

Верный ответ: В. градиенты концентраций, температуры, давления, полей внешних сил

5. Химические реакции, протекающие в термодинамической системе, приводят к изменению следующих термодинамических свойств системы:

Ответы:

А. масса системы, Б. энергия системы, В. температура системы

Верный ответ: В. температура системы

6. Скорость химических реакций, протекающих в системе, определяется следующими силами:

Ответы:

А. градиент концентраций, Б. градиент температуры, В. градиент давления, Г. ни один ответ не подходит

Верный ответ: Г. ни один ответ не подходит

7. Система называется сплошной средой, если:

Ответы:

А. Число частиц, содержащихся в системе, порядка числа Авогадро, Б. расстояние между частицами много меньше характерного масштаба системы, В. длина свободного пробега частиц порядка характерного масштаба системы.

Верный ответ: Б. расстояние между частицами много меньше характерного масштаба системы,

8. Энтропия неравновесной системы

Ответы:

А. всегда возрастает и стремится в максимуму, Б. не может оставаться равной константе, В. может оставаться равной константе сколько угодно долго.

Верный ответ: В. может оставаться равной константе сколько угодно долго.

9. Если термодинамическая система обменивается с внешней средой массой, энтропия такой системы

Ответы:

А. всегда увеличивается, Б. всегда уменьшается, В. может как увеличиваться так и уменьшаться.

Верный ответ: В. может как увеличиваться так и уменьшаться.

10. Плотность локального потока термодинамического признака определяется как количество данного признака, переносимое

Ответы:

А. через единицу площади, Б. за единицу времени, В. через единицу площади за единицу времени.

Верный ответ: В. через единицу площади за единицу времени.

II. Описание шкалы оценивания

Оценка: 5

Нижний порог выполнения задания в процентах: 70

Описание характеристики выполнения знания: Работа выполнена в рамках "продвинутого" уровня. Ответы даны верно, четко сформулированные особенности практических решений

Оценка: 4

Нижний порог выполнения задания в процентах: 60

Описание характеристики выполнения знания: Работа выполнена в рамках "базового" уровня. Большинство ответов даны верно. В части материала есть незначительные недостатки

Оценка: 3

Нижний порог выполнения задания в процентах: 50

Описание характеристики выполнения знания: Работа выполнена в рамках "порогового" уровня. Основная часть задания выполнена верно. на вопросы углубленного уровня

III. Правила выставления итоговой оценки по курсу

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