

**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  
Расчет процессов массопереноса**

**Москва  
2024**

## ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ РАЗРАБОТАЛ:

Разработчик

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Пятницкая Н.Ю.
	Идентификатор	R77942753-PiatnitskyaNY-ac3988a

Н.Ю.  
Пятницкая

## 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

## 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: Защита задания

1. Расчет элементов теплообменного оборудования с учетом процессов переноса массы (Перекрестный опрос)

Форма реализации: Письменная работа

1. Задачи конвективного тепло- и массообмена (Контрольная работа)

2. Одномерные задачи диффузии (Контрольная работа)

3. Основные понятия и закономерности процесса молекулярной диффузии в бинарных и многокомпонентных смесях (Контрольная работа)

## БРС дисциплины

### 2 семестр

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

КМ-1 Основные понятия и закономерности процесса молекулярной диффузии в бинарных и многокомпонентных смесях (Контрольная работа)

КМ-2 Одномерные задачи диффузии (Контрольная работа)

КМ-3 Расчет элементов теплообменного оборудования с учетом процессов переноса массы (Перекрестный опрос)

КМ-4 Задачи конвективного тепло- и массообмена (Контрольная работа)

**Вид промежуточной аттестации – Экзамен.**

Раздел дисциплины	Веса контрольных мероприятий, %				
	Индекс КМ:	КМ-1	КМ-2	КМ-3	КМ-4
	Срок КМ:	3	6	9	12
Основные понятия и закономерности процесса молекулярной диффузии в бинарных и многокомпонентных смесях					

Диффузия и причины ее возникновения	+	+		
Концентрация смеси	+	+		
Скорость диффузии	+	+		
Массовые и мольные потоки	+	+		
Закон Фика для бинарной смеси	+	+		
Эквимольная и эквимассовая противодиффузия	+	+		
Свойства смеси	+	+		
Аналогия процессов молекулярного переноса массы, импульса и энергии	+	+		
Расчет диффузии в многокомпонентных газовых смесях	+	+		
Термо- и бародиффузия в бинарной смеси	+	+		
Одномерные задачи диффузии				
Диффузия через неподвижный слой газовой смеси	+	+		
Каталитический реактор	+	+		
Диффузия сопровождающаяся гомогенной химической реакцией	+	+		
Одновременный перенос тепла и массы через слой газовой смеси	+	+		
Способы измерения влажности	+	+		
Нестационарное испарение	+	+		
Задачи конвективного тепло- и массообмена				
Уравнение конвективной диффузии				+
Уравнение сохранения импульса				+
Уравнения сохранения энергии				+
Аналогия процессов теплообмена и массообмена				+
Постановка и автомодельное решение задачи о сопротивлении трения, ТО и МО при продольном обтекании плоской пластины (ламинарное течение)				+
Расчет сопротивления трения, ТО и МО с учетом влияния поперечного потока массы				+
Расчет элементов теплообменного оборудования с учетом процессов переноса массы				

Расчет конденсатора методом Кольборна и Хоугена			+	
Вес КМ:	20	30	30	20

## 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 <sub>ПК-1</sub> Имеет навыки математического описания и моделирования процессов в рабочих телах и элементах энергетических установок	Знать: физические механизмы переноса тепла и массы и методы расчета свойств смеси; закономерности процессов и методы расчета тепло- и массообмена при фазовых превращениях. Уметь: составлять математическое описание процессов тепло- и массообмена применительно к режимам работы элементов энергетических установок; рассчитывать тепло- и массообменное оборудование энергетических установок.	КМ-1 Основные понятия и закономерности процесса молекулярной диффузии в бинарных и многокомпонентных смесях (Контрольная работа) КМ-2 Одномерные задачи диффузии (Контрольная работа) КМ-3 Задачи конвективного тепло- и массообмена (Контрольная работа) КМ-4 Расчет элементов теплообменного оборудования с учетом процессов переноса массы (Перекрестный опрос)

## II. Содержание оценочных средств. Шкала и критерии оценивания

### КМ-1. Основные понятия и закономерности процесса молекулярной диффузии в бинарных и многокомпонентных смесях

**Формы реализации:** Письменная работа

**Тип контрольного мероприятия:** Контрольная работа

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 20

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Проводится в период аудиторных занятий. Продолжительность контроля составляет 1 час 30 минут. Работы выполняются индивидуально по вариантам заданий.

#### Краткое содержание задания:

Решение двух задач

#### Контрольные вопросы/задания:

Запланированные результаты обучения по дисциплине	Вопросы/задания для проверки
Знать: закономерности процессов и методы расчета тепло- и массообмена при фазовых превращениях.	1. За какое время испарится лужа с заданными параметрами
Знать: физические механизмы переноса тепла и массы и методы расчета свойств смеси;	1. Определить молярную массу смеси заданного состава 2. Определить состав (доли) воздуха с заданной относительной влажностью 3. Рассчитать коэффициент диффузии газа А в газе В при заданных параметрах

#### Описание шкалы оценивания:

*Оценка: 5 («отлично»)*

*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 («хорошо»)*

*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 («удовлетворительно»)*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 50*

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

*Оценка: 2 («неудовлетворительно»)*

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "неудовлетворительно" выставляется если задание выполнено неверно или преимущественно не выполнено

## КМ-2. Одномерные задачи диффузии

**Формы реализации:** Письменная работа

**Тип контрольного мероприятия:** Контрольная работа

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 30

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Проводится в период аудиторных занятий. Продолжительность контроля составляет 1 час 30 минут. Работы выполняются индивидуально по вариантам заданий.

**Краткое содержание задания:**

Решение двух задач

**Контрольные вопросы/задания:**

Запланированные результаты обучения по дисциплине	Вопросы/задания для проверки
Знать: закономерности процессов и методы расчета тепло- и массообмена при фазовых превращениях.	1. Пробирка, нижняя часть которой заполнена водой, омывается снаружи потоком сухого воздуха. Расстояние от поверхности воды до верхнего края пробирки $L$ . Найти: а) расход воды (в массовых единицах); б) относительную влажность внутри пробирки ( $y = L/2$ )
Знать: физические механизмы переноса тепла и массы и методы расчета свойств смеси;	1. Рассчитать число Шмидта для смеси с заданными параметрами

**Описание шкалы оценивания:**

*Оценка: 5 («отлично»)*

*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 («хорошо»)*

*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 («удовлетворительно»)*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 50*

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

*Оценка: 2 («неудовлетворительно»)*

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "неудовлетворительно" выставляется если задание выполнено неверно или преимущественно не выполнено

## КМ-3. Расчет элементов теплообменного оборудования с учетом процессов переноса массы

**Формы реализации:** Защита задания

**Тип контрольного мероприятия:** Перекрестный опрос

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 30

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Защита расчетного задания "расчет конденсатора методом Кольборна и Хоугена" в виде обсуждения результата расчета с преподавателем.

**Краткое содержание задания:**

Обсуждение результата расчета

**Контрольные вопросы/задания:**

Запланированные результаты обучения по дисциплине	Вопросы/задания для проверки
Уметь: рассчитывать тепло- и массообменное оборудование энергетических установок.	<p>1. Пар конденсируется из насыщенной паровоздушной смеси, движущейся сверху вниз в вертикальной круглой трубе, наружная поверхность которой охлаждается водой.</p> <p>Труба диаметром 12×1 мм изготовлена из стали с теплопроводностью 15 Вт/(м·К).</p> <p>На наружной поверхности трубы имеются отложения, что создает дополнительное термическое сопротивление величиной <math>8 \cdot 10^{-4}</math> м<sup>2</sup>К/Вт.</p> <p>Коэффициент теплоотдачи со стороны охлаждающей воды можно принять постоянным и равным 5 кВт/(м<sup>2</sup>К).</p> <p>Термическое сопротивление пленки конденсата принять постоянным по длине и равным <math>10^{-4}</math> м<sup>2</sup>К/Вт.</p> <p>Давление смеси можно считать не изменяющимся по длине трубы.</p> <p>Определить длину трубы, необходимую для того, чтобы температура смеси на выходе стала равной <math>t_{out}</math>.</p>

**Описание шкалы оценивания:**

*Оценка: 5 («отлично»)*

*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 («хорошо»)*

*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 («удовлетворительно»)*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 50*

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

*Оценка: 2 («неудовлетворительно»)*

*Описание характеристики выполнения знания: Оценка "неудовлетворительно" выставляется если задание выполнено неверно или преимущественно не выполнено*

**КМ-4. Задачи конвективного тепло- и массообмена**

**Формы реализации:** Письменная работа

**Тип контрольного мероприятия:** Контрольная работа

**Вес контрольного мероприятия в БРС: 20**

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Проводится в период аудиторных занятий. Продолжительность контроля составляет 1 час 30 минут. Работы выполняются индивидуально по вариантам заданий.

**Краткое содержание задания:**

Решение задачи

**Контрольные вопросы/задания:**

Запланированные результаты обучения по дисциплине	Вопросы/задания для проверки
Уметь: составлять математическое описание процессов тепло- и массообмена применительно к режимам работы элементов энергетических установок;	1. На вертикальной пластине длиной 1 м и шириной 0,5 м конденсируется водяной пар из насыщенной паровоздушной смеси, которая движется вдоль пластины со скоростью 1 м/с. Пар не оказывает динамического воздействия на пленку конденсата. Найти расход пара, конденсирующегося на пластине, тепловой поток, проходящий через пластину и силу трения на ее поверхности. При расчете коэффициентов сопротивления трения, теплоотдачи и массоотдачи можно принять, что свойства смеси вдали от пластины равны свойствам чистого водяного пара в состоянии насыщения при заданном давлении. Расчет провести с учетом влияния поперечного потока массы на коэффициенты сопротивления трения, теплоотдачи и массоотдачи. Давление смеси $P$ ; Мольная доля воздуха вдали от пластины составляет $x_{\infty}$ ; Температура поверхности пленки конденсата постоянна по высоте пластины и равна $t_0$ .

**Описание шкалы оценивания:**

*Оценка: 5 («отлично»)*

*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 («хорошо»)*

*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 («удовлетворительно»)*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 50*

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

*Оценка: 2 («неудовлетворительно»)*

*Описание характеристики выполнения знания:* Оценка "неудовлетворительно" выставляется если задание выполнено неверно или преимущественно не выполнено

# СОДЕРЖАНИЕ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

## 2 семестр

Форма промежуточной аттестации: Экзамен

### Пример билета

Билет № 1
1. Закон Фика для бинарной смеси, эквимольная и эквимассовая противодиффузия
2. Расчет конденсатора парогазовой смеси по методу Кольборна и Хоугена
3. В психрометре, помещенном в комнате, сухой термометр показывает 20 °С, а «мокрый» 15 °С. Давление 0.101 МПа. Определить расчетным путем относительную влажность воздуха, сравнить ответ со значением, определенным по таблице

### Процедура проведения

Студент получает билет, с тремя вопросами - два теоретических и одна задача. Дается 1 час 30 минут на подготовку - запись ответов на теоретические вопросы и решение задачи. Студент устно сдает билет, отвечая на вопросы экзаменатора

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

**1. Компетенция/Индикатор:** ИД-1<sub>ПК-1</sub> Имеет навыки математического описания и моделирования процессов в рабочих телах и элементах энергетических установок

### Вопросы, задания

1.
  - Понятие молекулярной диффузии, причины ее возникновения
2.
  - Концентрация смеси, скорость диффузии, диффузионные потоки
3.
  - Закон Фика
4.
  - Эквимольная и эквимассовая противодиффузия
5.
  - Свойства смеси, коэффициент диффузии, теплоемкость, вязкость и коэффициент теплопроводности
6.
  - Законы переноса тепла и импульса, аналогичные закону Фика
7.
  - Расчет диффузии в многокомпонентной газовой смеси, для идеальных газовых смесей, с помощью уравнения Стефана-Максвелла, с помощью эффективного коэффициента диффузии
- 8.

- Термо- и бародиффузия в бинарной смеси
- 9.
- Диффузия через неподвижный слой газовой смеси
- 10.
- Задача о каталитическом реакторе
- 11.
- Задача о диффузии, сопровождающейся гомогенной химической реакцией
- 12.
- Перенос тепла в смеси, пленочная модель
- 13.
- Расчет теплового потока при конденсации пара из смеси
- 14.
- Расчет теплового потока при испарении в смесь
- 15.
- Адиабатное испарение
- 16.
- Способы измерения влажности, психрометр Августа
- 17.
- Расчет конденсатора методом Кольборна и Хоугена
- 18.
- Уравнения конвективной диффузии, сохранения импульса и энергии
- 19.
- Аналогия процессов тепло- и массообмена при умеренной интенсивности массообмена
- 20.
- Аналогия процессов тепло- и массообмена при высокой интенсивности массообмена
- 21.
- Постановка и автомодельное решение задачи о сопротивлении трения, теплообмене и массообмене при продольном обтекании плоской пластины
- 22.
- Расчет сопротивления трения, теплообмена и массообмена с учетом влияния поперечного потока массы

23. Решение задачи о нестационарном испарении

**24. Задача (для вопроса 3)**

В психрометре, помещенном в комнате, сухой термометр показывает  $t_0$  °С, а «мокрый»  $t_{\infty}$  °С. Давление 0.101 МПа.

Определить расчетным путем относительную влажность воздуха, сравнить ответ со значением, определенным по таблице

**25. Задача (для вопроса 3)**

Пробирка, нижняя часть которой заполнена водой, омывается снаружи потоком воздуха. Температура воздуха  $t$  °С, давление 0.101 МПа, относительная влажность  $\varphi$ , внутренний диаметр пробирки  $D$ , расстояние от поверхности воды до верхнего края пробирки  $L$ .

Определить поток массы водяного пара

**26. Задача (для вопроса 3)**

Пористая влажная пластина имеет температуру  $t_0$  °С и обдувается продольным потоком сухого воздуха, движущимся со скоростью  $W$  м/с и температурой  $t_\infty$  °С. Давление 0.101 МПа.

Определить коэффициент теплоотдачи на расстоянии  $L$  м от передней кромки пластины с учетом влияния поперечного потока массы.

Либо:

коэффициент массоотдачи

коэффициент сопротивления

плотность теплового потока

### Материалы для проверки остаточных знаний

1. Безразмерное число, показывающее соотношение интенсивностей между молекулярным переносом импульса и молекулярным переносом вещества

Ответы:

а)  $Pr$

б)  $Sc$

в)  $Sh$

г)  $Nu$

Верный ответ: б

2. Для двухкомпонентной смеси (где  $A$  - пар,  $B$  - газ, а  $P_s$  - давление насыщения) относительная влажность  $\phi$  определяется через давления как

Ответы:

а)  $P_A / P_s$

б)  $P_B / P_s$

в)  $(P_A + P_B) / P_s$

г)  $P_s / P_A$

Верный ответ: а

3. Молярная масса смеси можно вычислить через молярные доли  $x_i$  и молярные массы компонентов  $M_i$  как

Ответы:

а)  $\sum x_i \cdot M_i$

б)  $1 / (\sum x_i / M_i)$

в)  $(\sum M_i) / (\sum x_i)$

г)  $\sum (M_i / x_i)$

Верный ответ: а

4. Закон Фика в **массовых** единицах в **неподвижной** системе координат выглядит как

Ответы:

а)  $-\rho \cdot D_{AB} \cdot \nabla \omega_A$

б)  $-c \cdot D_{AB} \cdot \nabla \omega_A$

в)  $x_A \cdot (N_A + N_B) - c \cdot D_{AB} \cdot \nabla x_A$

г)  $\omega_A \cdot (n_A + n_B) - \rho \cdot D_{AB} \cdot \nabla \omega_A$

Верный ответ: г

5. С помощью коэффициента массоотдачи  $\beta$  плотность потока массы на поверхности испаряющейся жидкости (с парами  $A$ ) в смесь определяется как

Ответы:

а)  $\rho \cdot \beta \cdot (x_{A0} - x_{A\infty})$

б)  $\rho \cdot \beta \cdot (\omega_{A0} - \omega_{A\infty})$

в)  $\rho \cdot \beta \cdot (\omega_{A0} - \omega_{A\infty}) / (1 - \omega_{A0})$

г)  $\rho \cdot \beta \cdot (\omega_{A0} - \omega_{A\infty}) / (1 - x_{A0})$

Верный ответ: в

6. При испарении параметр проницаемости

Ответы:

- а) положительный
- б) отрицательный
- в) может быть как положительным, так и отрицательным

Верный ответ: а

7. При учете поперечного потока за счет конденсации коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  соотносится с коэффициентом без учета поперечного потока  $\alpha_0$ :

Ответы:

- а)  $\alpha > \alpha_0$
- б)  $\alpha < \alpha_0$
- в)  $\alpha = \alpha_0$

Верный ответ: а

8. Свойство взаимности означает, что

Ответы:

- а)  $D_{AB} = D_{BA}$
- б)  $\mathbf{j}_A + \mathbf{j}_B = 0$
- в)  $D_{AB} = -D_{BA}$
- г)  $\mathbf{J}^*_A + \mathbf{J}^*_B = 0$

Верный ответ: а

9. Формула Стефана (для диффузии через неподвижный слой газовой смеси) получена при следующих допущениях:

Ответы:

- а)  $c = const$
- б)  $D_{AB} = const$
- в)  $x_A \rightarrow 0$
- г) а) и б)
- д) а), б) и в)

Верный ответ: г

10. При отрицательном параметре проницаемости поправка Аккермана

Ответы:

- а) больше единицы
- б) меньше единицы
- в) может быть как больше, так и меньше единицы

Верный ответ: а

## II. Описание шкалы оценивания

*Оценка: 5 («отлично»)*

*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 («хорошо»)*

*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 («удовлетворительно»)*

*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

*Оценка: 2 («неудовлетворительно»)*

*Описание характеристики выполнения знания: Работа не выполнена или выполнена преимущественно неправильно*

### ***III. Правила выставления итоговой оценки по курсу***

Оценка выставляется в соответствии с положением о балльно-рейтинговой системе для студентов ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ".