

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

Направление подготовки/специальность: 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Наименование образовательной программы: Автономные энергетические системы. Водородная и электрохимическая энергетика

Уровень образования: высшее образование - магистратура

Форма обучения: Очная

**Оценочные материалы
по дисциплине
Тепломассоперенос в установках водородной и электрохимической
энергетики**

**Москва
2024**

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ РАЗРАБОТАЛ:

Разработчик

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Блинов Д.В.
	Идентификатор	R07cd0a36-BlinovDV-2a7575e4

Д.В. Блинов

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель
образовательной
программы

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Ланская И.И.
	Идентификатор	R3db6324d-Lanskyall-6f410db9

И.И.
Ланская

Заведующий
выпускающей кафедрой

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Кулешов Н.В.
	Идентификатор	Re9c42de9-KuleshovNV-bc390ed6

Н.В.
Кулешов

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-3 Способен к обеспечению бесперебойной работы, правильной эксплуатации и разработке мероприятий по совершенствованию технологии производства автономных энергетических систем, установок водородной, электрохимической энергетики и их элементов

ИД-1 Обосновывает потребности в техническом и материальном обеспечении эксплуатации автономных энергетических систем, установок водородной, электрохимической энергетики и их элементов

2. ПК-4 Способен к определению потребности производства в топливно-энергетических ресурсах, обоснованию мероприятий по экономии энергоресурсов, разработке норм их расхода, расчету потребностей производства автономных энергетических систем, установок водородной, электрохимической энергетики и их элементов в энергоресурсах

ИД-2 Разрабатывает мероприятия по энерго- и ресурсосбережению для автономных энергетических систем, установок водородной, электрохимической энергетики и их элементов

и включает:

для текущего контроля успеваемости:

Форма реализации: Письменная работа

1. Расчет затрат электроэнергии в высокотемпературных электролизерах (Контрольная работа)
2. Расчет потребностей установок водородной, электрохимической энергетики в энергоресурсах (Контрольная работа)
3. Расчет тепломассообменных процессов в электрохимических системах (Контрольная работа)

Форма реализации: Устная форма

1. Термодинамика и тепловые эффекты в электрохимических системах (Тестирование)

БРС дисциплины

3 семестр

Раздел дисциплины	Веса контрольных мероприятий, %				
	Индекс КМ:	КМ-1	КМ-2	КМ-3	КМ-4
	Срок КМ:	4	8	12	15
Основные термины, определения и понятия термодинамики электрохимических систем					
термодинамика электрохимических систем		+			

Тепломассообменные процессы в электрохимических системах				
Тепломассообменные процессы в электрохимических системах		+		
Определение влияния тепломассообменных процессов на потребности производства водорода электролизом воды в топливно-энергетических ресурсах				
Влияния тепломассообменных процессов на потребности в топливно-энергетических ресурсах			+	
Мероприятия по энерго- и ресурсосбережению для установок водородной, электрохимической энергетики				
Энерго- и ресурсосбережение для установок водородной, электрохимической энергетики				+
Вес КМ:	25	25	25	25

\$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-3	ИД-1ПК-3 Обосновывает потребности в техническом и материальном обеспечении эксплуатации автономных энергетических систем, установок водородной, электрохимической энергетики и их элементов	Знать: ИД-1ПК-3 способы разработки, модернизации, правильной эксплуатации оборудования электрохимических энергоустановок и в водородной энергетике Уметь: ИД-1ПК-3 определять влияния тепломассообменных процессов на энергоэффективность топливных элементов, химических источников тока и энергосбережение при производстве водорода электролизом воды	Термодинамика и тепловые эффекты в электрохимических системах (Тестирование) Расчет тепломассообменных процессов в электрохимических системах (Контрольная работа)
ПК-4	ИД-2ПК-4 Разрабатывает мероприятия по энерго- и ресурсосбережению для автономных энергетических систем, установок водородной,	Знать: ИД-2ПК-4 методы определения потребности электрохимических энергоустановок в топливе, производства	Расчет затрат электроэнергии в высокотемпературных электролизерах (Контрольная работа) Расчет потребностей установок водородной, электрохимической энергетики в энергоресурсах (Контрольная работа)

	электрохимической энергетики и их элементов	электролизного водорода в электроэнергии, обоснования мероприятий по уменьшению расхода топлива в электрохимических энергоустановках и электроэнергии в электролизерах Уметь: ИД-2ПК-4 эффективно использовать топливно- энергетические ресурсы в электрохимических энергоустановках и в водородной энергетике	
--	--	---	--

II. Содержание оценочных средств. Шкала и критерии оценивания

КМ-1. Термодинамика и тепловые эффекты в электрохимических системах

Формы реализации: Устная форма

Тип контрольного мероприятия: Тестирование

Вес контрольного мероприятия в БРС: 25

Процедура проведения контрольного мероприятия: Работа выполняется по вариантам теста на практическом занятии

Краткое содержание задания:

Работа ориентирована на проверку знаний в области термодинамики и тепловых эффектов в электрохимических системах

Контрольные вопросы/задания:

Знать: ИД-1ПК-3 способы разработки, модернизации, правильной эксплуатации оборудования электрохимических энергоустановок и в водородной энергетике	1. В обратимой реакции электролиза воды произведение температуры на энтропию реакции $T\Delta S$: 1. больше нуля, 2. меньше нуля, 3. примерно равно нулю Ответ 1 2. КПД термический (термодинамический) в обратимой электрохимической реакции в ТЭ показывает: 1. долю генерируемого тепла от общей энергии. 2. долю электроэнергии. 3. КПД ТЭ Ответ 3 3. В обратимой электрохимической реакции электролиза воды произведение zFE показывает 1. Максимальную потребляемую электрическую мощность, 2. минимальную мощность, 3. минимальную удельную электрическую работу Ответ 3 4. В обратимой электрохимической реакции в ТЭ энтальпия реакции показывает: 1. минимальный тепловой эффект 2. сумму электрической работы и теплоты, 3. разность электроэнергии и теплоты Ответ 1 5. В водород-кислородном ТЭ с увеличением температуры ЭДС 1. увеличивается, 2. уменьшается, 3. практически не меняется Ответ 1 6. В обратимой реакции высокотемпературного
--	--

	электролиза воды энтальпия реакции изменяется с изменением парциального давления водорода 1. увеличивается 2. уменьшается 3. изменяется незначительно Ответ 3 7. В обратимой электрохимической реакции электролиза воды произведение $zFE_{\text{тн}}$, где $E_{\text{тн}}$ термонеutralная ЭДС, показывает: 1. сумму минимальных потребляемых электрической мощности и потока тепла. 2. сумму минимальных потребляемых удельных электрической энергии и теплоты. 3. минимальную удельную электрическую работу. Ответ 2 8. В ТЭ удельное количество выделяемого тепла при производстве 1 моль водорода определяется уравнением: 1. $2F(U - E_{\text{тн}})$, 2. $2F(E_{\text{тн}} - U)$, 3. $2FU$. Ответ 1
--	--

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

Оценка: 2

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

КМ-2. Расчет тепломассообменных процессов в электрохимических системах

Формы реализации: Письменная работа

Тип контрольного мероприятия: Контрольная работа

Вес контрольного мероприятия в БРС: 25

Процедура проведения контрольного мероприятия: Работа выполняется по билетам на практическом занятии

Краткое содержание задания:

Работа ориентирована на проверку знаний в области термодинамики и тепловых эффектов в электрохимических системах

Контрольные вопросы/задания:

Уметь: ИД-1ПК-3 определять влияния тепломассообменных процессов на энергоэффективность топливных элементов, химических источников тока и энергосбережение при производстве водорода электролизом воды	1.Какой объем кислорода V переносится через электрохимическую ячейку на основе твердого электролита при плотности тока $i = 3 \text{ кА/м}^2$, проходящего через электродную поверхность высокотемпературного кислородного насоса площадью $0,2 \text{ м}^2$ в течение времени $\tau = 1$ часу при чисто ионной проводимости. Сколько тепла выделится при напряжении $U = 0,4 \text{ В}$? Напишите электродные процессы и выражение для определения ЭДС. 2.Какова ЭДС высокотемпературного твердооксидного топливного элемента, если молярная доля газов в смеси на входе в анодное пространство $\text{H}_2 - 0,84$, $\text{H}_2\text{O} - 0,12$, остальное примеси. В катодное пространство подается воздух. Общее давление 3 атм. Температура $T = 1223 \text{ К}$. Стандартная ЭДС $E^0 = 0,92 \text{ В}$. Каково минимальное количество выделяемого тепла в расчете на 1 моль H_2 вступившего в реакцию? 3.Как определить тепловой эффект химической и электрохимической реакций?
--	--

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**Оценка: 2**Описание характеристики выполнения знания: Оценка "неудовлетворительно" выставляется если задание выполнено неверно или преимущественно не выполнено***КМ-3. Расчет затрат электроэнергии в высокотемпературных электролизерах****Формы реализации:** Письменная работа**Тип контрольного мероприятия:** Контрольная работа**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 25**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Работа выполняется по билетам на практическом занятии**Краткое содержание задания:**

Работа ориентирована на проверку знаний в области затрат электроэнергии в высокотемпературных электролизерах

Контрольные вопросы/задания:

Знать: ИД-2ПК-4 методы определения потребности электрохимических энергоустановок в топливе, производства электролизного водорода в электроэнергии, обоснования мероприятий по уменьшению расхода топлива в электрохимических энергоустановках и электроэнергии в электролизерах	1. Как определить удельные затраты электроэнергии на производство одного нормального метра кубического водорода в электролизере? 2. Напишите выражение для расчета КПД электролизера. Объясните, от чего зависит каждое составляющее этого выражения. Какие имеются пути увеличения КПД? 3. Рассчитайте ЭДС высокотемпературного твердооксидного электролизера, если молярная доля газов в смеси на входе в катодное пространство H_2 - 0,05, H_2O - 0,95. Давление 5 атм, температура $T = 1223$ К. Стандартная ЭДС $E^0 = 0,92$ В. Каковы минимальные энергозатраты и количество выделяемого тепла в расчете на 1 моль полученного H_2?
---	---

Описание шкалы оценивания:*Оценка: 5**Нижний порог выполнения задания в процентах: 70**Описание характеристики выполнения задания: 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 задания: 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 задания: Оценка "удовлетворительно" выставляется если задание преимущественно выполнено**Оценка: 2**Описание характеристики выполнения задания: Оценка "неудовлетворительно" выставляется если задание выполнено неверно или преимущественно не выполнено***КМ-4. Расчет потребностей установок водородной, электрохимической энергетики в энергоресурсах****Формы реализации:** Письменная работа**Тип контрольного мероприятия:** Контрольная работа**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 25**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Работа выполняется по билетам на практическом занятии**Краткое содержание задания:**

Работа ориентирована на проверку знаний в области потребностей установок водородной, электрохимической энергетики в энергоресурсах

Контрольные вопросы/задания:

Уметь: ИД-2ПК-4 эффективно использовать топливно-энергетические ресурсы в	1. Для электрохимической системы: $CO ZrO_2Y_2O_3 O_2$ напишите уравнения электродных реакций. С использованием термодинамических функций
---	---

электрохимических энергоустановках и в водородной энергетике	рассчитайте стандартную ЭДС при $T = 1273 \text{ K}$. Рассчитайте термонеutralную ЭДС, теоретическую удельную на 1 м^3 топлива генерируемую электроэнергию W (кВт ч)/м^3 и ее практическое значения для напряжения ТЭ $U = 0,65 \text{ В}$ и степени использования топлива $\gamma_t = 0,85$. 2.Какой объемный расход водорода надо подать в анодное пространство высокотемпературного твердооксидного ТЭ, чтобы плотность тока составляла $i = 3,0 \text{ кА/м}^2$ через электродную поверхность площадью $S = 1,5 \text{ м}^2$ при степени использования топлива $\gamma_t = 0,9$? Напишите уравнения электродных реакций и токообразующую реакцию.
--	---

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

Оценка: 2

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

СОДЕРЖАНИЕ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

3 семестр

Форма промежуточной аттестации: Экзамен

Пример билета

1. Напишите уравнения параллельно протекающих реакций при паровой конверсии метана с указанием их теплового эффекта.
2. Напишите суммарную реакцию и электродные процессы для высокотемпературного твердооксидного ТЭ при использовании в качестве топлива оксида углерода. Приведите интегральную зависимость стандартной энтальпии реакции $\Delta_r H^0 T$ от температуры T в диапазоне 298 - 1273 К. Рассчитайте $\Delta_r H^0 T$ при $T = 1273$ К, пренебрегая зависимостью теплоемкости веществ участников реакции от температуры и считая изменение стандартной теплоемкости системы в ходе реакции постоянной, $\Delta_r C_{0p} = \text{const}$, рассчитайте ЭДС термонеutralную и удельное тепловыделение при реакции 1 моль оксида углерода при напряжении $U = 0,65$ В. Определите удельную генерируемую электроэнергию $W_{\text{уд}}$.
3. Напишите электродные процессы, протекающие в высокотемпературном кислородном насосе. Рассчитайте против-ЭДС на входе и выходе при температуре 1200 К, парциальном давлении кислорода в смеси с азотом на входе 21 кПа на выходе 16 кПа и полученного кислорода 100 кПа. Каковы удельные затраты электроэнергии $W(\text{кВт ч})/\text{м}^3$ на получение 1 м³ O₂ при напряжении 0,35 В?

Процедура проведения

Проводится в устной форме по билетам в виде подготовки и изложения развернутого ответа

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

1. Компетенция/Индикатор: ИД-1ПК-3 Обосновывает потребности в техническом и материальном обеспечении эксплуатации автономных энергетических систем, установок водородной, электрохимической энергетики и их элементов

Вопросы, задания

1. Напишите суммарную реакцию и электродные процессы для высокотемпературного твердооксидного электролизера диоксида углерода. Приведите интегральную зависимость стандартной энтальпии реакции $\Delta_r H^0 T$ от температуры T в диапазоне 298 - 1273 К.
2. Напишите уравнения параллельно протекающих реакций при паровой конверсии метана с указанием их теплового эффекта.
3. Напишите электродные процессы, протекающие в высокотемпературном кислородном насосе. Рассчитайте против-ЭДС на входе и выходе при температуре 1200 К, парциальном давлении кислорода в смеси с азотом на входе 21 кПа на выходе 16 кПа и полученного кислорода 100 кПа. Каковы удельные затраты электроэнергии $W(\text{кВт ч})/\text{м}^3$ на получение 1 м³ O₂ при напряжении 0,35 В?

Материалы для проверки остаточных знаний

1. Напишите уравнения парокислородной конверсии метана с указанием их теплового эффекта

Ответы:

Привести уравнения парокислородной конверсии метана с указанием их теплового эффекта

Верный ответ: Уравнения для расчета теплового эффекта парокислородной конверсии метана

2. Напишите суммарную реакцию и электродные процессы для высокотемпературного твердооксидного электролизера диоксида углерода. Приведите интегральную зависимость стандартной энтальпии реакции $\Delta_r H^0_T$ от температуры T в диапазоне 298 - 1273 К. Рассчитайте $\Delta_r H^0_T$ при $T = 1273$ К, пренебрегая зависимостью теплоемкости веществ от температуры и считая изменение стандартной теплоемкости системы в ходе реакции постоянной, т.е. $\Delta_r C_{0p} = \text{const}$, рассчитайте ЭДС термонеutralную и удельное тепловыделение при производстве 1 моль оксида углерода при напряжении $U = 1,9$ В. Определите удельную потребляемую электроэнергию $W_{\text{уд}}$. Напишите реакцию сдвига, используемую для получения водорода из оксида углерода и паров воды.

Ответы:

Написать уравнения электродных реакций в твердооксидном электролизёре. С применением закона Гесса рассчитать тепловой эффект суммарной электрохимической реакции в указанном диапазоне температур. Вычислить термонеutralную ЭДС.

Верный ответ: Катод: $1/2 O_2 + 2e^- = O^{2-}$ Анод: $CO + O^{2-} = CO_2 + 2e^-$ Суммарная реакция: $CO + 1/2 O_2 = CO_2$ $\Delta_r H^0_{1273} = -283,01$ кДж/моль термонеutralная ЭДС = 1,47 В удельное тепловыделение = 169,8 кДж/моль

2. Компетенция/Индикатор: ИД-2_{ПК-4} Разрабатывает мероприятия по энерго- и ресурсосбережению для автономных энергетических систем, установок водородной, электрохимической энергетики и их элементов

Вопросы, задания

1. Напишите уравнения парокислородной конверсии метана с указанием их теплового эффекта.

2. Для высокотемпературного ТЭН₂|ZrO₂Y₂O₃|Воздух напишите уравнения электродных реакций. С использованием термодинамических функций рассчитайте стандартную ЭДС при $T = 1173$ К. Рассчитайте максимально возможную удельную на 1 м³ расходуемого топлива генерируемую электроэнергию W (кВт ч)/м³ и ее значение при напряжении ТЭ $U = 0,7$ В.

Материалы для проверки остаточных знаний

1. Для высокотемпературного ТЭН₂|ZrO₂Y₂O₃|Воздух напишите уравнения электродных реакций. С использованием термодинамических функций рассчитайте стандартную ЭДС при $T = 1173$ К. Рассчитайте максимально возможную удельную на 1 м³ расходуемого топлива генерируемую электроэнергию W (кВт ч)/м³ и ее значение при напряжении ТЭ $U = 0,7$ В.

Ответы:

Написание процессов электродных реакций в топливном элементе и знание правил расчета термодинамических функций и стандартного ЭДС топливного элемента С помощью уравнения Нернста вычислить ЭДС ТЭ. С помощью закона Фарадея вычислить удельный расход топлива.

Верный ответ: На катоде протекает электрохимическая реакция: $O_2 + 4e^- = 2O^{2-}$ На аноде: $2H_2 + 2O^{2-} = 2H_2O + 4e^-$ Суммарная реакция: $2H_2 + O_2 = 2H_2O(g)$ $E_{11730} = 0,946$ В $W_{\text{уд}} = 1,554$ кВт*ч/м³.

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

Оценка: 2

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

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 аттестационной составляющих.