

**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
2023**

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ РАЗРАБОТАЛ:

Преподаватель

(должность)

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Григорьев С.А.
	Идентификатор	R7ba085e0-GrigoryevSA-87939df5

(подпись)

С.А.

Григорьев

(расшифровка
подписи)

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель
образовательной
программы

(должность, ученая степень, ученое
звание)

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

(подпись)

И.И. Ланская

(расшифровка
подписи)

Заведующий
выпускающей кафедры

(должность, ученая степень, ученое
звание)

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

(подпись)

Н.В.

Кулешов

(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-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

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	1. Какой объем кислорода V переносится через
----------------------------	--

влияния тепломассообменных процессов на энергоэффективность топливных элементов, химических источников тока и энергосбережение при производстве водорода электролизом воды	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

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	1.Как определить удельные затраты электроэнергии на производство одного нормального метра кубического водорода в электролизере?
--	---

энергоустановок в топливе, производства электролизного водорода в электроэнергии, обоснования мероприятий по уменьшению расхода топлива в электрохимических энергоустановках и электроэнергии в электролизерах	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 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. 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 электрохимических энергоустановках и в водородной энергетике	1. Для электрохимической системы: $CO ZrO_2Y_2O_3 O_2$ напишите уравнения электродных реакций. С использованием термодинамических функций рассчитайте стандартную ЭДС при $T = 1273$ К. Рассчитайте термонеutralную ЭДС, теоретическую удельную на 1 м³ топлива генерируемую электроэнергию W (кВт ч)/м³ и ее практическое значения для напряжения ТЭ $U = 0,65$ В и степени использования топлива $\eta_t = 0,85$. 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

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 $W_{уд}$.
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

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.