

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор физтех-школы  
электроники, фотоники и  
молекулярной физики**

**В.В. Иванов**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Физико-химические основы энергетических установок на топливных элементах
<b>по направлению:</b>	Материаловедение и технологии материалов
<b>профиль подготовки:</b>	Перспективные функциональные материалы
	Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики
	кафедра физики организованных структур и химических процессов
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 75 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: Д.А. Агарков, канд. физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры физики организованных структур и химических процессов  
12.02.2024

## Аннотация

Курс "Физико-химические основы энергетических установок на топливных элементах" предусматривает ознакомление обучающихся с основными принципами функционирования твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ), литий-ионных аккумуляторов, а также энергетических установок на их основе и системами автономной энергетики.

### 1. Цели и задачи

#### Цель дисциплины

- ознакомление обучающихся с основными принципами функционирования топливных элементов (ТЭ), литий-ионных аккумуляторов, а также энергетических установок на их основе и системами автономной энергетики.

#### Задачи дисциплины

- формирование базовых знаний и представлений о работе топливных элементов, литий-ионных аккумуляторов, построении систем контроля, управления и защиты, а также о создании энергетических установок на их основе и автономных систем автономной энергетики.

### 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны знать:

- общие принципы построения энергетической системы в рамках Арктической программы МФТИ;
- современное состояние науки и техники в области твердооксидных топливных элементов и энергоустановок на их основе;
- причины возникновения ЭДС в топливном элементе, факторы, влияющие на её значение, и термодинамические основы вычисления ЭДС;
- знак зависимости ЭДС от температуры, давления, доли непрореагировавших компонентов;
- вид вольт-амперной характеристики идеального ТЭ и её изменение при учёте внутреннего сопротивления;
- внутреннюю структуру твердооксидного топливного элемента;
- основные электрохимические процессы, дающие вклад в потери на ТЭ;
- структуру внутреннего сопротивления ТЭ;
- методы исследования и анализа структуры внутреннего сопротивления ТЭ;
- стабильность электрохимических характеристик ТЭ и связь с фазовыми и микроструктурными изменениями в ТЭ;
- вид распределения ионного и электронного токов в пористом электроде, параметры, определяющие сопротивление пористого электрода, вид годографа импеданса пористого электрода;
- концепцию химической ёмкости и ёмкости двойного заряженного слоя;
- современное состояние области науки, посвященной разработке функциональных материалов для их использования в качестве компонентов ТЭ;
- основные методы исследования ТЭ, электродных процессов и функциональных материалов;
- основные методы материалов ТЭ с использованием растровых и просвечивающих электронных микроскопов;
- классификацию мембранно-электродных блоков по геометрии и несущему элементу;
- основные методы изготовления структурных элементов ТЭ, их область применения и характеристики получаемых слоев;
- основные технические задачи, решаемые при разработке батареи ТЭ;
- область применения компьютерного моделирования для задач ТЭ, основные методы моделирования и принципы выбора того или иного метода;
- схемы снабжения батарей ТЭ топливом;
- характер зависимости предельного КПД системы от мощности при постоянном коэффициенте использования топлива;
- сущность и закономерности современного гетерогенного катализа;
- закономерности влияния свойств реагентов и продуктов реакций на состояние гетерогенных катализаторов в ходе эксплуатации;
- принцип работы и классификация химических источников тока;
- технологические аспекты производства литий-ионных аккумуляторов;
- основные материалы для изготовления современных ЛИА;
- принцип работы системы контроля, управления и защиты ЛИАБ;
- методы анализа экспериментальных данных при разработке и производстве ЛИА;
- принцип построения и функционирования системы накопления энергии и микросетей.

уметь:

- критически анализировать информацию по разработкам в области твердооксидных топливных элементов;
- рассчитывать ЭДС топливного элемента при данных условиях;
- рассчитывать напряжение на идеальном топливном элементе при данном токе и внешних условиях;
- анализировать структуру внутреннего сопротивления ТЭ по набору экспериментальных данных;
- сопоставлять данные электрохимических исследований, полученных в различных условиях работы ТЭ, и определять на их основе процесс, лимитирующий эффективность работы ТЭ;
- интерпретировать спектры импеданса электродов и определять направление оптимизации электродов на их основе;
- прогнозировать поведение физико-химических свойств материалов в условиях изготовления и эксплуатации ТЭ;
- критически анализировать литературные данные, посвященные испытаниям модельных ячеек ТЭ на основе нетрадиционных материалов;
- описать основные методы исследования ТЭ, электродных процессов и функциональных материалов;
- описать основные методы анализа материалов ТЭ с использованием растровых и просвечивающих электронных микроскопов, описать основные узлы и работу детекторов;
- производить подбор оптимальной методики изготовления по требованиям, предъявляемым к морфологии и составу структурного элемента ТЭ;
- рассчитывать вольт-амперную характеристику неидеального ТЭ с линейным омическим сопротивлением;
- выбирать модель для решения задач, встречающихся при разработке ТЭ;
- вычислять предельный КПД системы при данных топливе и рабочих условиях батареи ТЭ;
- разбираться в основных видах каталитических систем, имеющих большое значение для топливных элементов;
- применять основные законы химии для обсуждения свойств и характеристик гетерогенно-каталитических систем;
- ориентироваться в выборе электродных материалов для различных электрохимических систем;
- ориентироваться в особенностях технологических процессов формирования литий-ионных аккумуляторов;
- рассчитать предельные и номинальные характеристики ЛИА и ЛИАБ.

владеть:

- теоретическими знаниями по современному уровню развития технологии ТЭ;
- способами интерпретации данных, полученных электрохимическими методами исследования ТЭ;
- методологией современных методов исследования внутренней структуры сопротивления ТЭ;
- теоретическими знаниями, необходимыми для прогнозирования возможности использования различных групп соединений в качестве компонентов ТЭ;
- общим пониманием базового набора подходов и методов исследования ТЭ, электродных процессов в них, а также функциональных материалов;
- знаниями по принципам работы микроскопов, используемых при анализе материалов ТЭ (растровых и просвечивающих электронных);
- теоретическими знаниями по классификации мембранно-электродных блоков ТЭ по геометрии и несущему элементу;
- теоретическими знаниями по основным методам изготовления структурных элементов ТЭ;
- методами одномерного моделирования электродов, на уровне ТЭ;
- основными принципами методологии составления компьютерной модели;
- основными подходами проектирования батарей ТЭ;
- целостной системой знаний о гетерогенном катализе и механизмах, лежащих в основе реакций конверсии топлива в водородсодержащий газ для топливных элементов;
- навыками анализа методологических проблем, возникающих при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях;
- актуальной информацией о современных материалах и технологиях производства литий-ионных аккумуляторов;
- методами анализа экспериментальных данных при разработке и производстве ЛИА;
- методами моделирования работы ЛИА и ЛИАБ.

#### **4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий**

#### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Арктическая программа МФТИ в части энергетики	2			5
2	Твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ) и их применение	2			5
3	Термодинамика ТОТЭ	2			5
4	Структура внутреннего сопротивления ТОТЭ	4			5
5	Одномерная модель пористого электрода ТОТЭ	2			5
6	Общий подход к выбору функциональных материалов ТОТЭ	2			5
7	Функциональные материалы ТОТЭ	2			5
8	Деграция компонентов ТОТЭ	2			5
9	Методы исследования ТОТЭ	2			5
10	Микроскопические методы исследования в применении к ТОТЭ	2			5
11	Практическая реализация мембранно-электродных блоков ТОТЭ	2			5
12	Одномерная модель неидеального ТОТЭ. Практическая реализация батарей ТОТЭ	2			5
13	Применение компьютерного моделирования к задачам ТОТЭ	2			5
14	Интеграция батарей ТОТЭ в энергетические установки	2			10
Итого часов		30			75
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

#### 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 2 (Весенний)

##### 1. Арктическая программа МФТИ в части энергетики

Основные аспекты концепции создания энергетической системы опорного пункта связи для Арктического региона Российской Федерации.

Блок первичной генерации электрической энергии. Возобновляемые источники энергии. Ветровые генераторы в арктическом исполнении. Солнечные панели.

Блок генерации водорода. Электролизеры, их основные типы и современный уровень развития технологии. Щелочные электролизеры. Твердополимерные электролизеры. Твердооксидные электролизеры.

Блок хранения водорода. Хранение водорода в сжатом (компримированном виде), основные характеристики. Хранение водорода в металл-гидридных баллонах, основные параметры технологии. Хранение водорода в жидких органических носителях, основные характеристики, реакторы гидрирования и дегидрирования, типы жидких органических носителей (пар гидрирования-дегидрирования). Катализаторы гидрирования и дегидрирования.

Блок вторичной генерации электроэнергии и тепловой энергии. Типы топливных элементов. Твердоокисленные топливные элементы, энергоустановки на их основе, основные характеристики. Мембранно-электродные блоки, батареи. Твердополимерные топливные элементы, энергоустановки на их основе, основные характеристики. Микротурбины, основные характеристики. МультиМЭС – многорежимная мобильная электростанция с переменными оборотами дизельного двигателя и электронно-машинным генератором на постоянных магнитах.

Блок накопления электрической энергии. Литий-ионные аккумуляторы, их основные характеристики. Перспективные решения в области хранения электрической энергии.

Блок управления потоками мощности. Энергетические порты. Энергетический хаб. Энергетические роутеры. Применение искусственного интеллекта к задаче балансирования электрической энергии в микрогриде.

Блок подключение полезной нагрузки. Электроприемники. Теплоснабжение.

## 2. Твердоокисленные топливные элементы (ТОТЭ) и их применение

Принцип работы топливных элементов. Классификация топливных элементов по рабочей температуре. Классификация топливных элементов по переносимому через мембрану иону. Основные достоинства и недостатки различных типов топливных элементов.

Принцип работы твердоокисленных топливных элементов, принципиальная схема. Основные достоинства и недостатки технологии по сравнению с другими технологиями генерации электрической и тепловой энергии из первичных источников энергии (топлива). Место ТОТЭ среди других технологий генерации. Единичные мембранно-электродные блоки ТОТЭ, батареи (сборки, стеки) ТОТЭ, энергетические установки.

Рынок топливных элементов в разрезе различных регионов мира, характерных диапазонов мощности, характерных областей применения.

## 3. Термодинамика ТОТЭ

Первое начало термодинамики в случае обратимой электрохимической реакции. КПД процесса генерации электроэнергии на топливном элементе. Коэффициент использования топлива/окислителя. Связь ЭДС обратимой электрохимической реакции с изменением термодинамических потенциалов. Уравнение Нернста. ЭДС обратимой реакции окисления  $H_2$ ,  $CO$  и  $CH_4$  в зависимости от температуры и давления. Вольт-амперная характеристика идеального топливного элемента.

## 4. Структура внутреннего сопротивления ТОТЭ

Эффективность работы ТОТЭ напрямую зависит от величины его внутреннего сопротивления. Требование бесперебойной длительной работы ЭУ на ТОТЭ приводит к дополнительному требованию стабильности характеристик ТОТЭ во времени. Современный ТОТЭ представляет из себя многослойный (около 10 слоев) керамо-металлический пакет, каждый из структурных элементов которого вносит вклад в полное внутреннее сопротивление. Основные потери в ТОТЭ связаны с протеканием окислительно-восстановительных реакций и транспортом электронного и ионного токов. В процессе изготовления и работы структурные элементы ТОТЭ испытывают фазовые и морфологические изменения, влияющие на их вклад во внутреннее сопротивление элемента. В лекциях о структуре внутреннего сопротивления ТОТЭ будут освещены как вопросы внутренней структуры ТОТЭ и влияния ее на внутреннее сопротивление, так и вопросы эволюции сопротивления во времени.

Лекции о структуре внутреннего сопротивления ТОТЭ содержат в себе следующие тематические блоки; структура ТОТЭ и основные функции структурных элементов ТОТЭ; электрохимические процессы, протекающие в отдельных структурных элементах ТОТЭ и их вклад в полное внутреннее сопротивление ТОТЭ; подходы и методы анализа структуры внутреннего сопротивления ТОТЭ; стабильность внутреннего сопротивления ТОТЭ и основные факторы, влияющие на стабильность характеристик; фазовые и морфологические изменения структурных элементов ТОТЭ и связанное с ними изменение внутреннего сопротивления ТОТЭ.

## 5. Одномерная модель пористого электрода ТОТЭ

Распределённая электрохимическая реакция в пористом электроде. Модель электрода на основе цепи распределённых элементов. Возможность выражения химического потенциала в электрических единицах. Ёмкость двойного заряженного слоя. Химическая ёмкость. Расчёт сопротивления модели постоянному и переменному току. Частные случаи. Влияние нелинейности, газодиффузионных потерь.

## 6. Общий подход к выбору функциональных материалов ТОТЭ

Основные требования к материалам электролита, электродов, интерконнектора, герметика. Электронная, ионная, общая проводимость. Способы измерения проводимости и чисел переноса. Термическое, химическое расширение оксидных материалов, способы их измерения. Электрохимическая поляризация, ее виды, причины возникновения, способы измерения.

## 7. Функциональные материалы ТОТЭ

Электролиты. Вакансионный, межузельный механизм кислород-ионного переноса. Электролиты на основе диоксида циркония, основные подходы к улучшению их функциональных свойств. Проблема старения электролитных материалов, пути ее решения. Электролиты на основе оксида церия, их преимущества и ограничения. Электролиты на основе галлата лантана, их преимущества и ограничения. Другие группы материалов с доминирующей кислород-ионной проводимостью.

Катоды. Основные закономерности изменения функциональных свойств сложнооксидных материалов в зависимости от положения составляющих элементов в Периодической системе химических элементов. Катодные материалы на основе манганита лантана, их структурные и физико-химические особенности. Способы изготовления и нанесения катодных слоев на основе манганитов. Низкотемпературные катоды, их преимущества и ограничения. Композитные катоды.

Аноды. Металл-керамические композитные аноды (керметы). Преимущества и ограничения использования никельсодержащих анодов. Способы изготовления и нанесения никельсодержащих анодов. Биметаллические, безникелевые керметы. Аноды на основе керамических материалов со смешанной проводимостью, их преимущества, ограничения и примеры использования.

Интерконнекторы. Керамические и металлические интерконнекторы, их преимущества и ограничения. Проблема загрязнения компонентов ТОТЭ хромом, основные механизмы и способы ее решения.

Герметики. Способы герметизации ячейки ТОТЭ. Стеклокерамические герметики, их основные характеристики. Способы изготовления и нанесения герметиков.

## 8. Деградация компонентов ТОТЭ

Основные причины деградации компонентов ТОТЭ. Микроструктурная деградация, ее причины и способы устранения. Фазовая стабильность компонентов ТОТЭ. Деградация анодов в углеводородном и серосодержащем топливе. Взаимодействие между компонентами ТОТЭ. Защитные подслои, их назначение, способы нанесения и недостатки.

## 9. Методы исследования ТОТЭ

Основные методы исследования твердооксидных топливных элементов. Исследование вольтамперных и мощностных характеристик. Импедансная спектроскопия. Хронопотенциометрия. Микроскопические методы исследования. Хроматография и анализ состава газовых смесей.

Основные методы исследования электродных процессов в ТОТЭ. Комбинационное рассеяние света. Микроскопические методы исследования. Исследование электродной поляризации.

Основные методы исследования функциональных материалов. Термогравиметрический анализ. Дифференциальный термический анализ (ДТА) и дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК). Дилатометрия, термическое и химическое расширение материалов. Высокотемпературная электронная и ионная проводимость. Изучение чисел переноса. Измерение коэффициента Зеебека. Времяпролетная вторично-ионная масс-спектропия и изотопный обмен.

## 10. Микроскопические методы исследования в применении к ТОТЭ

Целью лекции является теоретическое освоение слушателями наиболее распространенных методов анализа материалов ТОТЭ с использованием растровых и просвечивающих электронных микроскопов. В лекции будут рассмотрены устройства основных узлов электронных микроскопов, описана работа детекторов и рассмотрены примеры исследования некоторых материалов.

Взаимодействие ускоренных электронов с веществом. Устройство электронных микроскопов. Растровая электронная микроскопия (РЭМ). Количественный и полуколичественный рентгеноспектральный микроанализ на РЭМ. Подготовка образцов для исследования на РЭМ. Просвечивающая электронная микроскопия. Дифракция ускоренных электронов при взаимодействии с кристаллическими материалами. Просвечивающая электронная микроскопия высокого разрешения.

Элементный анализ с использованием ПЭМ. Подготовка образцов для исследования на ПЭМ.

## 11. Практическая реализация мембранно-электродных блоков ТОТЭ

Мембранно-электродный блок является базовым звеном технологии твердооксидных топливных элементов. Существует множество подходов к реализации ТОТЭ, которые можно классифицировать по таким параметрам, как геометрия, несущий элемент, тип токосъема и т.д. Каждый из подходов к реализации ТОТЭ имеет свои преимущества и недостатки, которые будут освещены на лекции. К примеру, элементы трубчатой конструкции наиболее устойчивы к термическим стрессам, однако, съём тока с них существенно затруднен. В то же время, для элементов планарной конструкции, где обеспечение эффективного контакта электрод | токосъём не представляет таких сложностей, существенной проблемой является разделение окислительного и топливного объемов. Выбор элемента мембранно-электродного блока, несущего основные механические нагрузки, во много определяет возможные используемые методы изготовления остальных слоев ТОТЭ и допустимые технологические режимы обработки. Так элементы на основе несущего металла не допускают применения высокотемпературных обработок в окислительной атмосфере. Отдельное внимание будет уделено методам изготовления как несущих подложек, так и остальных слоев мембранно-электродных блоков ТОТЭ. Можно выделить четыре основных группы методов изготовления структурных элементов ТОТЭ: коллоидные, аэрозольные, физического и химического осаждения. Будут освещены области применения каждого из методов и возможные характеристики получаемых слоев.

## 12. Одномерная модель неидеального ТОТЭ. Практическая реализация батарей ТОТЭ

Вывод уравнения относительно коэффициента использования топлива вдоль канала. Эффективное внутреннее сопротивление идеального ТОТЭ. Решение методом конечных разностей. Зависимость вольт-амперной характеристики ТОТЭ от его сопротивления. Учёт нелинейной поляризации электродов и диффузионных потерь – расчёт с помощью специализированного ПО.

Задачи, возникающие при проектировании батареи ТОТЭ. Способы герметизации, создания электрического контакта. Геометрические варианты. Пример первой батареи ИФТТ РАН.



### 13. Применение компьютерного моделирования к задачам ТОТЭ

Область применения компьютерного моделирования для задач ТОТЭ. Примеры задач, решаемых моделированием.

Основы метода конечных элементов. Моделирование мембранно-электродного блока.

Моделирование топливного элемента. Основные методы упрощения модели.

Выбор размерности задачи. Использование симметрий. Метод последовательных приближений. Метод эффективных сред. Выделение существенных степеней свободы. Моделирование батареи топливных элементов.

Моделирование энергоустановки. Блок-схема модельной задачи. Краткий обзор некоторых программных пакетов по моделированию.

### 14. Интеграция батарей ТОТЭ в энергетические установки

Основные схемы снабжения батарей ТОТЭ топливом: простая, с рециклом водорода, с рециклом воды, с конверсией анодными газами. Расчёт предельного КПД системы на базе ТОТЭ. Зависимость КПД и тепловыделения от снимаемой мощности.

## 5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Учебная аудитория, оснащенная мультимедийным проектором и экраном.

Самостоятельная работа студента обеспечивается доступностью библиотечного фонда.

## 6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

Литература выдается на кафедре:

1. Иванов-Шниц К.И., Мурин И.В, Ионика твердого тела. Т. 2, С.-Пб., Издательство СПбГУ, 2000
2. Чеботин В.Н., Перфильев М.В., Электрохимия твердых электролитов, М., «Химия», 1978
3. Чоркендорф И., Наймантсведрайт Х. Современный катализ и химическая кинетика. Долгопрудный: «Интеллект», 2010. - 504 с.
4. Боресков Г.К. Гетерогенный катализ. М.: Наука, 1986. - 304 с.
5. Крылов О.В. Гетерогенный катализ. М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. - 679 с.

Дополнительная литература

Литература выдается на кафедре:

1. Кириллов В.А., Кузин Н.А. Амосов Ю.И. Киреев В.В. Собянин В.А. Катализаторы конверсии углеводородных и синтетических топлив для бортовых генераторов синтез газа// Катализ в промышленности, 2011., №1. С. 60 - 67.

## 7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

1. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

<http://www.issp.ac.ru/sofc-school2017/program.html>

<http://www.issp.ac.ru/sofc-school2017/dir/Presentation.pdf>

<http://www.issp.ac.ru/fuelcell2018/dir/Proceedings.pdf>

ScienceDirect [Electronic resource] / Elsevier B.V. – URL: <http://www.sciencedirect.com/>

База данных Национального института стандартов и технологий NIST – URL:

<http://www.nist.gov/>

## **8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)**

При подготовке и чтении лекций может потребоваться следующее программное обеспечение:  
MS Word, MS Power Point.

## **9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)**

Студент, изучающий дисциплину, должен с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике. В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения дисциплины, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует:

- посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом по дисциплине;
- ведения конспекта занятий;
- напряжённой самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях.

Показателем владения материалом служит умение без конспекта отвечать на вопросы по темам дисциплины.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к преподавателю.

Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Материаловедение и технологии материалов
<b>профиль подготовки:</b>	Перспективные функциональные материалы Физтех-школа Электроники, Фотоники и Молекулярной Физики кафедра физики организованных структур и химических процессов
<b>курс:</b>	<u>1</u>
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен

**Разработчик:** Д.А. Агарков, канд. физ.-мат. наук

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Физико-химические основы энергетических установок на топливных элементах» обучающийся должен:

**знать:**

- общие принципы построения энергетической системы в рамках Арктической программы МФТИ;
- современное состояние науки и техники в области твердооксидных топливных элементов и энергоустановок на их основе;
- причины возникновения ЭДС в топливном элементе, факторы, влияющие на её значение, и термодинамические основы вычисления ЭДС;
- знак зависимости ЭДС от температуры, давления, доли непрореагировавших компонентов;
- вид вольт-амперной характеристики идеального ТЭ и её изменение при учёте внутреннего сопротивления;
- внутреннюю структуру твердооксидного топливного элемента;
- основные электрохимические процессы, дающие вклад в потери на ТЭ;
- структуру внутреннего сопротивления ТЭ;
- методы исследования и анализа структуры внутреннего сопротивления ТЭ;
- стабильность электрохимических характеристик ТЭ и связь с фазовыми и микроструктурными изменениями в ТЭ;
- вид распределения ионного и электронного токов в пористом электроде, параметры, определяющие сопротивление пористого электрода, вид годографа импеданса пористого электрода;
- концепцию химической ёмкости и ёмкости двойного заряженного слоя;
- современное состояние области науки, посвященной разработке функциональных материалов для их использования в качестве компонентов ТЭ;
- основные методы исследования ТЭ, электродных процессов и функциональных материалов;
- основные методы материалов ТЭ с использованием растровых и просвечивающих электронных микроскопов;
- классификацию мембранно-электродных блоков по геометрии и несущему элементу;
- основные методы изготовления структурных элементов ТЭ, их область применения и характеристики получаемых слоев;
- основные технические задачи, решаемые при разработке батареи ТЭ;
- область применения компьютерного моделирования для задач ТЭ, основные методы моделирования и принципы выбора того или иного метода;
- схемы снабжения батарей ТЭ топливом;
- характер зависимости предельного КПД системы от мощности при постоянном коэффициенте использования топлива;
- сущность и закономерности современного гетерогенного катализа;
- закономерности влияния свойств реагентов и продуктов реакций на состояние гетерогенных катализаторов в ходе эксплуатации;
- принцип работы и классификация химических источников тока;
- технологические аспекты производства литий-ионных аккумуляторов;
- основные материалы для изготовления современных ЛИА;
- принцип работы системы контроля, управления и защиты ЛИАБ;
- методы анализа экспериментальных данных при разработке и производстве ЛИА;
- принцип построения и функционирования системы накопления энергии и микросетей.

**уметь:**

- критически анализировать информацию по разработкам в области твердооксидных топливных элементов;
- рассчитывать ЭДС топливного элемента при данных условиях;
- рассчитывать напряжение на идеальном топливном элементе при данном токе и внешних условиях;
- анализировать структуру внутреннего сопротивления ТЭ по набору экспериментальных данных;
- сопоставлять данные электрохимических исследований, полученных в различных условиях работы ТЭ, и определять на их основе процесс, лимитирующий эффективность работы ТЭ;
- интерпретировать спектры импеданса электродов и определять направление оптимизации электродов на их основе;
- прогнозировать поведение физико-химических свойств материалов в условиях изготовления и эксплуатации ТЭ;
- критически анализировать литературные данные, посвященные испытаниям модельных ячеек ТЭ на основе нетрадиционных материалов;
- описать основные методы исследования ТЭ, электродных процессов и функциональных материалов;
- описать основные методы анализа материалов ТЭ с использованием растровых и просвечивающих электронных микроскопов, описать основные узлы и работу детекторов;
- производить подбор оптимальной методики изготовления по требованиям, предъявляемым к морфологии и составу структурного элемента ТЭ;
- рассчитывать вольт-амперную характеристику неидеального ТЭ с линейным омическим сопротивлением;
- выбирать модель для решения задач, встречающихся при разработке ТЭ;
- вычислять предельный КПД системы при данных топливе и рабочих условиях батареи ТЭ;
- разбираться в основных видах каталитических систем, имеющих большое значение для топливных элементов;
- применять основные законы химии для обсуждения свойств и характеристик гетерогенно-каталитических систем;
- ориентироваться в выборе электродных материалов для различных электрохимических систем;
- ориентироваться в особенностях технологических процессов формирования литий-ионных аккумуляторов;
- рассчитать предельные и номинальные характеристики ЛИА и ЛИАБ.

**владеть:**

- теоретическими знаниями по современному уровню развития технологии ТЭ;
- способами интерпретации данных, полученных электрохимическими методами исследования ТЭ;
- методологией современных методов исследования внутренней структуры сопротивления ТЭ;
- теоретическими знаниями, необходимыми для прогнозирования возможности использования различных групп соединений в качестве компонентов ТЭ;
- общим пониманием базового набора подходов и методов исследования ТЭ, электродных процессов в них, а также функциональных материалов;
- знаниями по принципам работы микроскопов, используемых при анализе материалов ТЭ (растровых и просвечивающих электронных);
- теоретическими знаниями по классификации мембранно-электродных блоков ТЭ по геометрии и несущему элементу;
- теоретическими знаниями по основным методам изготовления структурных элементов ТЭ;
- методами одномерного моделирования электродов, на уровне ТЭ;
- основными принципами методологии составления компьютерной модели;
- основными подходами проектирования батарей ТЭ;
- целостной системой знаний о гетерогенном катализе и механизмах, лежащих в основе реакций конверсии топлива в водородсодержащий газ для топливных элементов;
- навыками анализа методологических проблем, возникающих при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях;
- актуальной информацией о современных материалах и технологиях производства литий-ионных аккумуляторов;
- методами анализа экспериментальных данных при разработке и производстве ЛИА;
- методами моделирования работы ЛИА и ЛИАБ.

**3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю**

С целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия по теме прошлой лекции или в конце занятия по пройденной теме.

#### **4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся**

Вопросы к экзамену:

1. Описать базовые принципы построения энергетического комплекса для автономных объектов (например, находящихся в Арктическом регионе). Назвать основные блоки перспективного энергетического комплекса.
2. Назвать основные технологии первичной генерации электроэнергии в условиях построения автономной энергетической системы, описать основные проблемы их применения.
3. Назвать основные методы хранения водорода с указанием достоинств и недостатков, а также характерных значений содержания водорода по отношению к общему объему и массе системы хранения.
4. Описать принцип работы топливных элементов. Описать основные типы топливных элементов и провести их базовую классификацию. Назвать характерные достоинства и недостатки различных типов топливных элементов.
5. Описать принцип работы твердооксидных топливных элементов. Назвать основные достоинства и недостатки технологии с указанием характерных параметров. Описать характерные уровни построения энергетической установки на ТОТЭ.
- 6.
7. Структура внутреннего сопротивления ТОТЭ: омический и поляризационный вклады.
8. Методы анализа структуры внутреннего сопротивления ТОТЭ.
9. Пользуясь справочными и литературными данными, спрогнозировать поведение (стабильность, парциальная электронная и ионная проводимость) заданного материала или группы материалов в окислительных и восстановительных условиях.
10. Назвать основные методы исследования твердооксидных топливных элементов, электродных процессов в них, а также функциональных материалов для ТОТЭ. Описать измеряемые для каждого метода величины.
11. Назовите основные методы анализа материалов ТОТЭ с использованием растровых и просвечивающих электронных микроскопов. Опишите устройство основных узлов электронных микроскопов и работу детекторов.
12. Привести примеры исследования материалов ТОТЭ при помощи микроскопических методов исследования. Описать подготовку образцов.
13. Классификации мембранно-электродных блоков ТОТЭ.
14. Основные методы изготовления структурных элементов мембранно-электродных блоков ТОТЭ и область их применения.
15. Основные принципы подбора компьютерных моделей для задач ТОТЭ. Основные методы упрощения модели. Метод конечных элементов. Метод эффективных сред.

Примеры экзаменационных билетов.

Пример 1:

1. Основные элементы структуры ТОТЭ и их функции.
2. Описать принцип работы топливных элементов. Описать основные типы топливных элементов и провести их базовую классификацию. Назвать характерные достоинства и недостатки различных типов топливных элементов.

Пример 2:

1. Основные методы изготовления структурных элементов мембранно-электродных блоков ТОТЭ и область их применения.
2. Назвать основные методы хранения водорода с указанием достоинств и недостатков, а также характерных значений содержания водорода по отношению к общему объему и массе системы хранения.

## Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

## **5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

Промежуточная аттестация по дисциплине проводится в форме устного экзамена. В экзаменационном билете два теоретических вопроса. Время на подготовку к ответу 60 минут. Время опроса на экзамене не более 60 минут.