

**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**

**Рабочая программа дисциплины (модуля)**

<b>по дисциплине:</b>	Основы конструирования и моделирования электрохимических источников энергии
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Физика перспективных технологий: альтернативная энергетика, научное программирование и 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: 45 всего, в том числе:

лекции: 45 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 60 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составили:

Д.А. Агарков, канд. физ.-мат. наук

А.В. Левченко, канд. хим. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры физики организованных структур и химических процессов  
04.04.2022

## Аннотация

Курс "Основы конструирования и моделирования электрохимических источников энергии" предусматривает формирование у обучающихся специализированных представлений о теоретических и экспериментальных аспектах устройства современных химических источников тока: литий-ионных аккумуляторов, топливных элементов с протонообменной мембраной и суперконденсаторов. Курс охватывает материаловедческие основы компонентов химических источников тока: электродов и электролитов. Изучение взаимосвязи между свойствами используемых материалов и характеристиками химических источников тока, рассмотрение методов создания и исследования различных химических источников тока.

### 1. Цели и задачи

#### Цель дисциплины

- ознакомление студентов с основными принципами функционирования протонообменных топливных элементов (ПОМТЭ), а также энергетических установок на их основе и автономных энергетических систем.

#### Задачи дисциплины

- формирование базовых знаний и представлений о работе протонообменных топливных элементов, построении систем контроля, управления и защиты, а также создание на их основе энергетических установок 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 в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	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:

- вид ВАХ идеальных ПОМТЭ и ее изменение при учете внутреннего сопротивления;
- внутренняя структура твердооксидного топливного элемента;
- основные электрохимические процессы, способствующие потерям ПОМТЭ;
- структура внутреннего сопротивления ПОМТЭ;
- методы исследования и анализа структуры внутреннего сопротивления ПОМТЭ;
- стабильность электрохимических характеристик ПОМТЭ и взаимосвязь с фазовыми и микроструктурными изменениями ПОМТЭ;
- тип распределения ионного и электронного токов в пористом электроде, параметры, определяющие сопротивление пористого электрода, вид годографа импеданса пористого электрода;
- понятие химической емкости и емкости двойного заряженного слоя;
- современное состояние области науки, посвященной разработке функциональных материалов для их использования в качестве компонентов ПОМТЭ;
- основные методы исследования ПОМТЭ, электродных процессов и функциональных материалов;
- основные методы исследования материалов ПОМТЭ с использованием растровых и просвечивающих электронных микроскопов;
- классификация мембранно-электродных узлов по геометрии и опорному элементу;
- основные способы изготовления конструктивных элементов ПОМТЭ, область их применения и характеристики получаемых слоев;
- основные технические проблемы, которые предстоит решить при разработке стека ПОМТЭ;
- область применения компьютерного моделирования для задач ПОМТЭ, основные методы моделирования и принципы выбора того или иного метода;
- схемы снабжения батареи ПОМТЭ топливом и воздухом;
- характер зависимости предельного КПД системы от мощности при постоянном коэффициенте использования топлива;
- сущность и закономерности современного гетерогенного катализа;
- закономерности влияния свойств реагентов и продуктов реакции на состояние гетерогенных катализаторов в процессе эксплуатации.

уметь:

- критически анализировать информацию о разработках в области твердооксидных топливных элементов;
- рассчитать ЭДС топливного элемента при заданных условиях;
- рассчитать напряжение на идеальном топливном элементе при заданном токе и внешних условиях;
- провести анализ структуры внутреннего сопротивления ПОМТЭ по набору экспериментальных данных;
- сопоставить данные электрохимических исследований, полученные при различных режимах работы ПОМТЭ, и определить на их основе процесс, ограничивающий эффективность ПОМТЭ;
- интерпретировать спектры импеданса электродов и определять на их основе направления оптимизации электродов;
- прогнозировать поведение физико-химических свойств материалов в условиях изготовления и эксплуатации ПОМТЭ;
- критически проанализировать литературные данные по испытаниям моделей ПОМТЭ на нетрадиционных материалах;
- описать основные методы исследования ПОМТЭ, электродных процессов и функциональных материалов;
- описать основные методы анализа материалов ПОМТЭ с помощью сканирующего и просвечивающего электронных микроскопов, описать основные узлы и работу детекторов;
- рассчитать ВАХ неидеальных ПОМТЭ с линейным омическим сопротивлением;
- выбрать модель решения проблем, возникающих при разработке ПОМТЭ;
- рассчитать предельную эффективность системы для заданного топлива и условий работы батареи ПОМТЭ;
- разбираться в основных типах каталитических систем, имеющих большое значение для топливных элементов;
- применять основные законы химии для обсуждения свойств и характеристик гетерогенных каталитических систем.

владеть:

- теоретические знания современного уровня развития ПОМТЭ;
- методы интерпретации данных, полученных электрохимическими методами исследования ПОМТЭ;
- методология современных методов исследования внутренней структуры сопротивления ПОМТЭ;
- теоретические знания, необходимые для прогнозирования возможности использования различных групп соединений в качестве компонентов ПОМТЭ;
- общее представление об основном наборе подходов и методов исследования ПОМТЭ, электродных процессов в них, а также функциональных материалов;
- знание принципов работы микроскопов, используемых при анализе материалов ПОМТЭ (сканирующий и просвечивающий электронный);
- теоретические знания основных методов изготовления конструктивных элементов ПОМТЭ;
- методы одномерного моделирования электродов на уровне ПОМТЭ;
- основные принципы методики составления компьютерной модели;
- основные подходы к проектированию стеков ПОМТЭ;
- система знаний о гетерогенном катализе и механизмах, лежащих в основе реакций конверсии топлива в водородсодержащий газ для топливных элементов;
- навыки анализа методологических проблем, возникающих при решении научно-практических задач, в том числе в междисциплинарных областях.

#### 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	Топливные элементы с полимерным электролитом (ПОМТЭ) и их применение	2			2
2	Термодинамика ПОМТЭ	2			2
3	Мембраны для ПОМТЭ, особенности работы ПОМТЭ в зависимости от типа мембраны	2			2
4	Топливо для ПОМТЭ	2			2
5	Структура внутреннего сопротивления ПОМТЭ	2			2
6	Электроды и электродные материалы для ПОМТЭ	2			3
7	Функциональные компоненты ПОМТЭ	2			3
8	Особенности газотранспорта и водного менеджмента в ПОМТЭ	2			3
9	Методы исследования ПОМТЭ	2			3
10	Деградация компонентов ПОМТЭ	2			3
11	Практическая реализация мембранно-электродных сборок ПОМТЭ	2			3
12	Одномерная модель ПОМТЭ и стеков ПОМТЭ. Практическая реализация стеков ПОМТЭ	2			3
13	Применение компьютерного моделирования к задачам ПОМТЭ	2			3
14	Интеграция стеков ПОМТЭ в энергоустановки	2			3

15	Моделирование энергоустановок на основе ПОМТЭ	2			3
16	Суперконденсаторы (ионисторы), литиевые аккумуляторы, топливные элементы. Устройство и особенности конструкций	3			5
17	Типы электролитов и особенности работы с ними	4			5
18	Электродные материалы для суперконденсаторов, литиевых аккумуляторов и топливных элементов. Особенности и способы получения	4			5
19	Методы исследований характеристик суперконденсаторов, литиевых аккумуляторов и топливных элементов	4			5
Итого часов		45			60
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. Топливные элементы с полимерным электролитом (ПОМТЭ) и их применение

Как работают ПОМТЭ. Типы топливных элементов с мембраной из полимерного электролита. Основные преимущества и недостатки различных типов топливных элементов. Принцип работы топливных элементов с полимерным электролитом, принципиальная схема. Основные преимущества и недостатки технологии по сравнению с другими технологиями получения электрической и тепловой энергии из первичных источников энергии (топлива). Место ПОМТЭ среди других технологий генерации. Одиночные мембранно-электродные сборки ПОМТЭ, пакеты ПОМТЭ (сборки, блоки), электростанции.

Рынок топливных элементов в разрезе разных регионов мира, типовые диапазоны мощностей, типовые области применения.

Практический урок по общим принципам топливных элементов с полимерным электролитом, нишам их применения.

##### 2. Термодинамика ПОМТЭ

Первый закон термодинамики в случае обратимой электрохимической реакции. КПД процесса выработки электроэнергии на топливном элементе. Коэффициент использования топлива/окислителя. Связь ЭДС обратимой электрохимической реакции с изменением термодинамических потенциалов. Уравнение Нернста. ЭДС обратимой реакции окисления  $H_2$  и  $CH_3OH$  в зависимости от температуры и давления. Вольт-амперная характеристика идеального топливного элемента.

Практический урок по термодинамике ПОМТЭ.

##### 3. Мембраны для ПОМТЭ, особенности работы ПОМТЭ в зависимости от типа мембраны

Жидкие, керамические, полимерные и композиционные электролиты, катионообменные и анионообменные мембраны для низкотемпературных топливных элементов. Возможности использования различных типов электролитов в топливных элементах. Влияние свойств электролитов на характеристики ПОМТЭ. Особенности работы ПОМТЭ в зависимости от типа мембраны: топлива и условий работы.

Практическое занятие по влиянию типа мембраны на свойства ПОМТЭ.

#### 4. Топливо для ПОМТЭ

В топливных элементах с мембраной из полимерного электролита могут использоваться различные виды топлива. Водород, метанол и другие топлива для ПОМТЭ: особенности протекания электрохимических реакций и физико-химических процессов в зависимости от вида топлива и типа электролита. Типы катализаторов для окисления различных видов топлива.

Практический урок по различным видам топлива для ПОМТЭ.

#### 5. Структура внутреннего сопротивления ПОМТЭ

Эффективность работы ПОМТЭ напрямую зависит от величины его внутреннего сопротивления. Требование бесперебойной длительной работы энергоустановки на основе ПОМТЭ приводит к дополнительному требованию стабильности характеристик ПОМТЭ во времени. Одиночная ячейка современного ПОМТЭ представляет собой многослойный (7-10 слоев) сложный пакет, каждый из конструктивных элементов которого вносит свой вклад в общее внутреннее сопротивление. Основные потери в ПОМТЭ связаны с окислительно-восстановительными реакциями.

Лекции по структуре внутреннего сопротивления ПОМТЭ содержат следующие тематические блоки: структура ТОТЭ и основные функции конструктивных элементов ПОМТЭ; электрохимические процессы, протекающие в отдельных структурных элементах ПОМТЭ, и их вклад в общее внутреннее сопротивление ПОМТЭ; подходы и методы анализа структуры внутреннего сопротивления ПОМТЭ; стабильность внутреннего сопротивления ПОМТЭ и основные факторы, влияющие на стабильность характеристик.

Практический урок по структуре внутреннего сопротивления ПОМТЭ.

#### 6. Электроды и электродные материалы для ПОМТЭ

Типы электродов для ПОМТЭ. Влияние материалов катализаторов на механизм и кинетику электрохимических реакций, протекающих на электродах. Особенности условий работы электродов ПОМТЭ. Требования к физико-химическим свойствам: пористость, гидрофобные и гидрофильные свойства, химическая и электрохимическая стабильность.

Практическое занятие по электродам и электродным материалам для ПОМТЭ.

#### 7. Функциональные компоненты ПОМТЭ

Основные требования к материалам и компонентам: электролит, электроды, газодиффузионные слои, биполярные пластины. Электронная, ионная, суммарная проводимость компонентов. Электрохимическая поляризация, ее виды, причины возникновения, методы измерения. Влияние параметров компонентов на КПД, удельную мощность и устойчивость.

Практический урок по функциональным материалам ПОМТЭ.

#### 8. Особенности газотранспорта и водного менеджмента в ПОМТЭ

Газотранспорт и водный менеджмент – одна из ключевых особенностей эффективной работы ПОМТЭ. Топливо и окислитель должны быть эффективно подведены к электрокатализатору, а продукты реакции должны быть эффективно удалены. Эффективность этих процессов зависит от пористости электрода, свойств газодиффузионных слоев и биполярных пластин и полей их течения.

Практическое занятие по транспорту газа и водному хозяйству ПОМТЭ.

#### 9. Методы исследования ПОМТЭ

Основные методы исследования твердооксидных топливных элементов. Исследование вольт-амперных и мощностных характеристик. Импедансная спектроскопия. Различные виды вольтамперных методов и другие электрохимические методы. Микроскопические методы исследования. Основные методы исследования электродных процессов в ПОМТЭ. Исследование поляризации электродов. Изучение эффективности электрокатализаторов и механики реакций. Газовый кроссовер и водное хозяйство.  
Практическое занятие по методам исследования ПОМТЭ.

#### 10. Дegradaция компонентов ПОМТЭ

Основные причины деградации топливных элементов с полимерным электролитом. Дegradaция электрокаталитических материалов: снижение эффективности катализатора, окисление носителя катализатора, деградация каталитического слоя. Дegradaция мембраны. Дegradaция биполярных пластин: окисление границы раздела биполярная пластина/газодиффузионный слой.  
Практический урок по деградации компонентов ПОМТЭ.

#### 11. Практическая реализация мембранно-электродных сборок ПОМТЭ

Мембранно-электродные сборки являются основой технологии ПОМТЭ. Существует несколько подходов к реализации ПОМТЭ. Особое внимание будет уделено методам изготовления всех слоев мембранно-электродных сборок ПОМТЭ. Выделяют четыре основные группы методов изготовления конструктивных элементов ТОТЭ: напыление, трафаретная печать, *dr.blade* и др. Будут выделены области применения каждого из методов и возможные характеристики получаемых слоев.

#### 12. Одномерная модель ПОМТЭ и стеков ПОМТЭ. Практическая реализация стеков ПОМТЭ

Вывод уравнения для коэффициента использования топлива по руслу. Эффективное внутреннее сопротивление идеального ПОМТЭ. Зависимость вольт-амперной характеристики ПОМТЭ от его сопротивления. Учет нелинейной поляризации электродов и диффузионных потерь – расчет с помощью специализированного программного обеспечения.

Задачи, возникающие при проектировании стека ПОМТЭ. Способы герметизации, создания электрического контакта. Геометрические варианты.

Практический урок по одномерной модели ПЭМТЭ и стека ПЭМТЭ, а также по практической реализации стеков ПЭМТЭ.

#### 13. Применение компьютерного моделирования к задачам ПОМТЭ

Область применения компьютерного моделирования для задач ПОМТЭ. Примеры задач, решаемых моделированием. Моделирование мембранно-электродной сборки. Моделирование топливного элемента. Основные методы упрощения модели.

Выбор размерности проблемы. Использование симметрий. Метод последовательных приближений. Метод эффективных медиа. Выделение существенных степеней свободы. Моделирование стека топливных элементов.

Блок-схема модельной задачи. Краткий обзор некоторых пакетов программного обеспечения для моделирования.

Практический урок по применению компьютерного моделирования к задачам ПОМТЭ.

#### 14. Интеграция стеков ПОМТЭ в энергоустановки

Основные схемы снабжения топливом батареи ПОМТЭ: простая, с рециклом водорода, продувкой водородом. Основные схемы снабжения батареи ПОМТЭ воздухом: ТЭ с открытым катодом, ТЭ с закрытым катодом. Расчет предельной эффективности системы на основе ПОМТЭ. Зависимость КПД и тепловыделения от отбираемой мощности. Системы воздушного и жидкостного охлаждения.

Практический урок по интеграции стека PEMFC в электростанции.

## 15. Моделирование энергоустановок на основе ПОМТЭ

Одномерное моделирование энергоустановок на топливных элементах с полимерным электролитом. Моделирование стеков топливных элементов и вспомогательных систем. Взаимосвязь параметров компонентов силовой установки. Основные параметры моделирования и моделирования программного обеспечения.

Практическое занятие по моделированию энергоустановок на основе ПОМТЭ.

## 16. Суперконденсаторы (ионисторы), литиевые аккумуляторы, топливные элементы. Устройство и особенности конструкций

Устройство и конструкционные особенности суперконденсаторов, топливных элементов и литиевых аккумуляторов. Особенности работы каждого из типов ХИТ, отличия ХИТ друг от друга. Сферы применения различных ХИТ исходя из их типа и конструктивных особенностей. Достоинства и недостатки ХИТ для различных сфер применений.

Семинары:

Сопоставление характеристик суперконденсаторов, топливных элементов и литиевых аккумуляторов по удельной мощности и энергоемкости. Оценка возможности применения в составе различных устройств.

## 17. Типы электролитов и особенности работы с ними

Жидкие, твердые, полимерные, композиционные, гель и др. электролиты для суперконденсаторов, топливных элементов и литиевых аккумуляторов. Возможности использования того или иного типа электролита в составе ХИТ различного типа. Влияние свойств электролитов на характеристики ХИТ. Проводимость электролита - методы исследования, влияние воды, влагосодержания, толщины слоя, модификатора.

Семинары:

Определение возможности использования выбранного типа электролита для суперконденсаторов, топливных элементов или литиевых аккумуляторов. Оценка влияния свойств электролита на характеристики ХИТ.

## 18. Электродные материалы для суперконденсаторов, литиевых аккумуляторов и топливных элементов. Особенности и способы получения

Виды электродов для суперконденсаторов. Влияние свойств материалов электродов на емкость и зарядно-разрядные характеристики конденсаторов. Способы характеристики. Анодные материалы для литиевых аккумуляторов. Типы используемых материалов, способы повышения безопасности, емкости, обратимости, рабочих токов. Катодные материалы для литиевых аккумуляторов. Типы используемых материалов, способы повышения безопасности, емкости, обратимости, рабочих токов. Способы характеристики катодных и анодных электродов. Электроды для твердополимерных топливных элементов. Особенности условий работы, требования к физико-химическим свойствам. Способы характеристики. Способы получения электродов ХИТ в зависимости от их физико-химических характеристик. Их достоинства и недостатки. Спрей-напыление, вакуумное напыление, магнетронное напыление, трафаретная печать, экструзия, нанесение на бункерно-ракельной установке. Управление свойствами получаемых электродов изменением условий получения.

Семинары:

Приготовление электродов для литиевого аккумулятора и суперконденсатора. Условия работы. Оборудование. Требования.

Приготовление катализатора и создание электродов для ТПТЭ – твердополимерного топливного элемента. Роль иономера. Способы синтеза. Методы характеристики. Используемое оборудование. Условия приготовления. Оценка характеристик ХИТ в зависимости от типа используемых электродов.

## 19. Методы исследований характеристик суперконденсаторов, литиевых аккумуляторов и топливных элементов



Методы и подходы к исследованию материалов (электродные материалы, катализаторы, электролиты), используемых для создания суперконденсаторов, топливных элементов и литиевых аккумуляторов. Методы исследования характеристик компонентов ХИТ (электродных слоев, электролитов): определение удельной емкости или электрокаталитической активности, исследование стабильности. Исследование характеристик ХИТ: определение удельной энергоемкости, максимальной мощности, определение ресурса, исследование влияния внешних условий на характеристики ХИТ.

Семинары:

Разработка комплекса методов для исследования, выбранного типа ХИТ от материалов до устройства. Расчет характеристик выбранного типа ХИТ.

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

Учебная аудитория, оснащенная мультимедийным проектором и экраном.

## **6.Перечень рекомендуемой литературы**

Основная литература

Литература выдается на кафедре:

1. Иванов-Шниц К.И., Мурин И.В, Ионика твердого тела, Том 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.
6. Боресков Г.К. Катализ. Ч.1, 2. Новосибирск, 1971. 267 с.

Дополнительная литература

Литература выдается на кафедре:

1. Иванов-Шниц К.И., Мурин И.В, Ионика твердого тела, Том 1, С.-Пб., Издательство СПбГУ, 2000
2. N.Q. Minh, T. Takakhashi, Science and Technology of Ceramic Fuel Cells, Elsevier Science, 1995.
3. T. Ishihara, Perovskite Oxides for Solid Oxide Fuel Cells, Springer Science, 2009
4. Introduction to Finite Element Method /T. H. Kwon, 2005
5. Кириллов В.А., Кузин Н.А. Амосов Ю.И. Киреевков В.В. Собянин В.А. Катализаторы конверсии углеводородных и синтетических топлив для бортовых генераторов синтез газа// Катализ в промышленности,-2011., №1. С. 60 - 67.
6. Собянин В.А. Высокотемпературные твердооксидные топливные элементы и конверсия метана// Журнал российского химического общества им. Д.И. Менделеева,-2003., №6. С. 62 - 70.
7. Dicks A.L. Advances in catalysts for internal reforming in high temperature fuel cells// Journal of Power Sources V. 71, 1998, 111–122
8. Advances in Chemical Engineering, Vol. 41: Fuel Cell Engineering, Elsevier, 2012. 467 С.
9. Bagotsky V. Fuel Cells - Problems and Solutions 2nd ed. Wiley, 2012. 395 с.
10. Srinivasan S. Fuel Cells - From Fundamentals to Applications Springer, 2006. 705 с.
11. Subhash C Singhal, Kevin Kendall, High Temperature Solid Oxide Fuel Cells. Fundamentals, Design and Applications, Elsevier Science, 2003
13. V.V. Kharton, Solid State Electrochemistry (v. 1, 2), Wiley-VCH, 2011
14. Modeling solid oxide fuel cells: methods, procedures and techniques /Roberto Bove, S. Ubertini - Springer, 2008
15. Jamnik, J. Generalised equivalent circuits for mass and charge transport: chemical capacitance and its implications / J.Jamnik, J.Maier // Physical Chemistry Chemical Physics. — 2001. — V. 3. — pp. 1668–1678.

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

Не используются

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

не предусмотрены.

**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>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Физика перспективных технологий: альтернативная энергетика, научное программирование и 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

**Разработчики:**

Д.А. Агарков, канд. физ.-мат. наук  
А.В. Левченко, канд. хим. 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 в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	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 «Основы конструирования и моделирования электрохимических источников энергии» обучающийся должен:

### знать:

- вид ВАХ идеальных ПОМТЭ и ее изменение при учете внутреннего сопротивления;
- внутренняя структура твердооксидного топливного элемента;
- основные электрохимические процессы, способствующие потерям ПОМТЭ;
- структура внутреннего сопротивления ПОМТЭ;
- методы исследования и анализа структуры внутреннего сопротивления ПОМТЭ;
- стабильность электрохимических характеристик ПОМТЭ и взаимосвязь с фазовыми и микроструктурными изменениями ПОМТЭ;
- тип распределения ионного и электронного токов в пористом электроде, параметры, определяющие сопротивление пористого электрода, вид годографа импеданса пористого электрода;
- понятие химической емкости и емкости двойного заряженного слоя;
- современное состояние области науки, посвященной разработке функциональных материалов для их использования в качестве компонентов ПОМТЭ;
- основные методы исследования ПОМТЭ, электродных процессов и функциональных материалов;
- основные методы исследования материалов ПОМТЭ с использованием растровых и просвечивающих электронных микроскопов;
- классификация мембранно-электродных узлов по геометрии и опорному элементу;
- основные способы изготовления конструктивных элементов ПОМТЭ, область их применения и характеристики получаемых слоев;
- основные технические проблемы, которые предстоит решить при разработке стека ПОМТЭ;
- область применения компьютерного моделирования для задач ПОМТЭ, основные методы моделирования и принципы выбора того или иного метода;
- схемы снабжения батареи ПОМТЭ топливом и воздухом;
- характер зависимости предельного КПД системы от мощности при постоянном коэффициенте использования топлива;
- сущность и закономерности современного гетерогенного катализа;
- закономерности влияния свойств реагентов и продуктов реакции на состояние гетерогенных катализаторов в процессе эксплуатации.

### уметь:

- критически анализировать информацию о разработках в области твердооксидных топливных элементов;
- рассчитать ЭДС топливного элемента при заданных условиях;
- рассчитать напряжение на идеальном топливном элементе при заданном токе и внешних условиях;
- провести анализ структуры внутреннего сопротивления ПОМТЭ по набору экспериментальных данных;
- сопоставить данные электрохимических исследований, полученные при различных режимах работы ПОМТЭ, и определить на их основе процесс, ограничивающий эффективность ПОМТЭ;
- интерпретировать спектры импеданса электродов и определять на их основе направления оптимизации электродов;
- прогнозировать поведение физико-химических свойств материалов в условиях изготовления и эксплуатации ПОМТЭ;
- критически проанализировать литературные данные по испытаниям моделей ПОМТЭ на нетрадиционных материалах;
- описать основные методы исследования ПОМТЭ, электродных процессов и функциональных материалов;
- описать основные методы анализа материалов ПОМТЭ с помощью сканирующего и просвечивающего электронных микроскопов, описать основные узлы и работу детекторов;
- рассчитать ВАХ неидеальных ПОМТЭ с линейным омическим сопротивлением;
- выбрать модель решения проблем, возникающих при разработке ПОМТЭ;
- рассчитать предельную эффективность системы для заданного топлива и условий работы батареи ПОМТЭ;
- разбираться в основных типах каталитических систем, имеющих большое значение для топливных элементов;
- применять основные законы химии для обсуждения свойств и характеристик гетерогенных каталитических систем.

#### **владеть:**

- теоретические знания современного уровня развития ПОМТЭ;
- методы интерпретации данных, полученных электрохимическими методами исследования ПОМТЭ;
- методология современных методов исследования внутренней структуры сопротивления ПОМТЭ;
- теоретические знания, необходимые для прогнозирования возможности использования различных групп соединений в качестве компонентов ПОМТЭ;
- общее представление об основном наборе подходов и методов исследования ПОМТЭ, электродных процессов в них, а также функциональных материалов;
- знание принципов работы микроскопов, используемых при анализе материалов ПОМТЭ (сканирующий и просвечивающий электронный);
- теоретические знания основных методов изготовления конструктивных элементов ПОМТЭ;
- методы одномерного моделирования электродов на уровне ПОМТЭ;
- основные принципы методики составления компьютерной модели;
- основные подходы к проектированию стеков ПОМТЭ;
- система знаний о гетерогенном катализе и механизмах, лежащих в основе реакций конверсии топлива в водородсодержащий газ для топливных элементов;
- навыки анализа методологических проблем, возникающих при решении научно-практических задач, в том числе в междисциплинарных областях.

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

В начале каждого занятия предусмотрен краткий опрос по теме предыдущей лекции

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

Вопросы к экзамену:

1. Топливные элементы с полимерным электролитом (ПОМТЭ) и их применение
2. Термодинамика ПОМТЭ
3. Мембраны для ПОМТЭ, особенности работы ПОМТЭ в зависимости от типа мембраны

4. Топливо для ПОМТЭ
5. Структура внутреннего сопротивления ПОМТЭ
6. Электроды и электродные материалы для ПОМТЭ
7. Функциональные компоненты ПОМТЭ
8. Особенности газотранспорта и водного менеджмента в ПОМТЭ
9. Методы исследования ПОМТЭ
10. Дегградация компонентов ПОМТЭ
11. Практическая реализация мембранно-электродных сборок ПОМТЭ
- 12 . Одномерная модель ПОМТЭ и стеков ПОМТЭ. Практическая реализация стеков ПОМТЭ
- 13 . Применение компьютерного моделирования к задачам ПОМТЭ
- 14 . Интеграция стеков ПОМТЭ в энергоустановки
- 15 . Моделирование энергоустановок на основе ПОМТЭ
- 16 . Суперконденсаторы (ионисторы), литиевые аккумуляторы, топливные элементы. Устройство и особенности конструкций
17. Типы электролитов и особенности работы с ними
- 18 . Электродные материалы для суперконденсаторов, литиевых аккумуляторов и топливных элементов. Особенности и способы получения
- 19 . Методы исследований характеристик суперконденсаторов, литиевых аккумуляторов и топливных элементов

Примеры экзаменационных билетов:

Пример 1:

- 1.Топливные элементы с полимерным электролитом (ПОМТЭ) и их применение
2. Электродные материалы для суперконденсаторов, литиевых аккумуляторов и топливных элементов. Особенности и способы получения

Пример 2:

1. Особенности газотранспорта и водного менеджмента в ПОМТЭ
2. Методы исследований характеристик суперконденсаторов, литиевых аккумуляторов и топливных элементов

#### 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 проводится в форме устного экзамена. В экзаменационном билете два теоретических вопроса. Время на подготовку к экзамену 60 минут. Опрос студента по билету не должен превышать 60 минут.