

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

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе

д.т.н. проф.  Драгунов В.К.

« 23 »  2022 г.



**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА**

**специальной дисциплины 2.4.5. Энергетические системы и**

**комплексы**

(профиль Электрохимические энергоустановки)

Программа составлена на основе паспорта специальности научных работников и программы - минимум кандидатского экзамена по специальности 2.4.5. Энергетические системы и комплексы в действующей редакции и в соответствии с Положением о подготовке научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (адъюнктуре), утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 30 ноября 2021г. № 2122.

## **ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

**Целью** дисциплины является изучение специальных разделов, относящихся к электрохимическим процессам в энергетике для последующего применения полученных знаний при разработке технологии создания химических преобразователей энергии.

**Задачами** дисциплины являются:

- познакомить обучающихся с электрохимическими основами функционирования химических источников тока и электролизеров, с их классификацией;
- познакомить обучающихся с термодинамическими и кинетическими закономерностями работы химических преобразователей энергии;
- познакомить обучающихся с физико-химическими принципами технологии изготовления функциональных и конструкционных материалов для химических преобразователей энергии;
- научить создавать новые электрохимические системы с повышенной энергетической эффективностью;
- научить производить расчеты и эскизное проектирование новых электрохимических преобразователей энергии.

## **МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ПРОГРАММЫ АСПИРАНТУРЫ**

Специальная дисциплина в структуре программы аспирантуры входит в Блок 2 «Образовательный компонент. Общая трудоемкость составляет 7 зачетных единиц (з.е.). Педагогическая практика выполняется в течение всего периода обучения. Распределение ее общего объема по годам обучения приводится в учебном плане программы аспирантуры. Педагогическая практика является стационарной, проводится на кафедрах НИУ «МЭИ».

### **Направления исследований:**

1 Разработка научных основ (подходов) исследования общих свойств и принципов функционирования и методов расчета, алгоритмов и программ выбора и оптимизации параметров, показателей качества и режимов работы энергетических систем, комплексов, энергетических установок на органическом и альтернативных топливах и возобновляемых видах энергии в



целом и их основного и вспомогательного оборудования.

2 Математическое моделирование, численные и натурные исследования физико-химических и рабочих процессов, протекающих в энергетических системах и установках на органическом и альтернативных топливах и возобновляемых видах энергии, их основном и вспомогательном оборудовании и общем технологическом цикле производства электрической и тепловой энергии.

3 Разработка, исследование, совершенствование действующих и освоение новых технологий и оборудования для производства электрической и тепловой энергии, использования органического и альтернативных топлив, и возобновляемых видов энергии, водоподготовки и водно-химических режимов, способов снижения негативного воздействия на окружающую среду, повышения надежности и ресурса элементов энергетических систем, комплексов и входящих в них энергетических установок.

4 Разработка научных подходов, методов, алгоритмов, технологий конструирования и проектирования, контроля и диагностики, оценки надежности основного и вспомогательного оборудования энергетических систем, станций и энергокомплексов и входящих в них энергетических установок.

5 Разработки и исследования в области энергосбережения и ресурсосбережения при производстве тепловой и электрической энергии, при транспортировке тепловой, электрической энергии и энергоносителей в энергетических системах и комплексах.

## **Отрасль науки**

– технические науки;

### **Введение**

#### 1. Общие положения

Мировые тенденции и проблемы развития электрохимических технологий в водородной энергетике. Способы производства водорода: кислородная и парокислородная конверсия природного газа, получение водорода с помощью угля, химические и электрохимические циклы, другие способы производства водорода. Место электрохимического способа производства водорода в атомно-водородной и возобновляемой энергетике. Тенденции и проблемы создания топливных элементов. Применение топливных элементов в стационарных энергоустановках, на транспорте, в специальных целях. Мировой рынок топливных элементов. Конструктивные разновидности химических источников тока. Основные характеристики химических источников тока. Электрические характеристики первичных элементов. Эксплуатационные характеристики. Сравнительные характеристики. История создания и развития аккумуляторов. Области применения. Мировой рынок: тенденции и проблемы аккумуляторов.

#### 2. Технологии производства водорода



Виды конверсии углеводородов. Пиролиз. Газификация твердых углеводородов. Конверсия углеводородов. Равновесный состав и тепловой эффект пароводяной конверсии метана. Расчет равновесного состава «реакции сдвига». Катализаторы пароводяной конверсии метана. Термоэлектрохимические циклы. Физические способы производства водорода. Водно-щелочной и твердополимерный электролиз. Тепломассоперенос в щелочной электролизной электрохимической системе. Катализаторы катодного выделения водорода и анодного выделения кислорода. Мембранно-электродные блоки. Принципы конструирования электролизеров. Высокотемпературные электролизеры.

### 3. Способы хранения водорода

Способы хранения и транспорта водорода. Техничко-экономическое сравнение различных способов хранения и транспортировки водорода: газобаллонного, в жидком виде, хранение в гидридах металлов и др.

### 4. Использование водорода в энергетике и на транспорте

Использование низкотемпературных и высокотемпературных электролизеров воды и топливных элементов для сглаживания пиковых нагрузок в энергосистеме. Энерготехнологические комплексы на основе водорода. Принципиальная схема атомно-водородного энергоблока. Сравнительные характеристики ГТУ при использовании в качестве топлива водорода и стандартного углеводорода. Аккумуляция энергии возобновляемых источников. Водород на транспорте. Заправочные водородные станции.

### 5. Классификации топливных элементов

Классификации топливных элементов по типу электролита, типу топлива и окислителя и по температуре эксплуатации. Критерии эффективности работы топливных элементов. Сравнение КПД тепловых электрических станций и топливных элементов. Термодинамика топливного элемента. Максимальная электрическая работа. Расчет электрических потенциалов, ЭДС и рабочее напряжение топливного элемента.

### 6. Топливные элементы с твердым полимерным электролитом

Области применения топливных элементов с твердым полимерным электролитом (ТПЭ). Принципиальная схема водородного топливного элемента с ТПЭ. Электродокаталитический слой. Газодиффузионные электроды, микропористый подслой. Биполяры. Электродные реакции. Процессы электроокисления водорода и электровосстановления кислорода. Вольт-амперная и ватт-амперная характеристики.

Мембранно-электродные блоки. Оптимизация процессов массопереноса в зоне воздушного электрода (катада). Особенности кинетики электрохимических реакций при работе топливных элементов с ТПЭ.

### 7. Водно-щелочные топливные элементы

Мировые компании-лидеры в производстве водно-щелочных топливных элементов. Достижения НПО «Центротех».

Электродные реакции. Особенности электроокисления водорода и электровосстановления кислорода. Электродокаталитаторы анодной реакции



окисления водорода. Электродокатализаторы катодного восстановления кислорода. Пористые разделительные диафрагмы и мембраны в щелочных топливных элементах. Процессы тепло и массопереноса в щелочной ячейке.

#### 8. Фосфорнокислые топливные элементы

Преимущества и недостатки фосфорнокислых топливных элементов по сравнению с твердополимерными и щелочными топливными элементами. Особенности кинетики электрохимических реакций при работе фосфорнокислых топливных элементов. Электродокатализаторы анодной реакции окисления водорода и катодного восстановления кислорода. Пористая термостойкая матрица для электролита.

#### 9. Высокотемпературные топливные элементы

Виды высокотемпературных топливных элементов, их преимущества и недостатки. Термодинамика высокотемпературных топливных элементов. Расплавно-карбонатные топливные элементы (РКТЭ). Топливо для РКТЭ. Принципиальные схемы энергоустановок с внутренней и внешней конверсией природного газа. Процессы на электродах. Особенности использования расплава карбонатов щелочных металлов в качестве электролита. Перспективы ухода от благородных электродокатализаторов. Твердоокисные топливные элементы (ТОТЭ). Электродные, мембранные и др. материалы.

#### 10. Электролиты первичных элементов

Водные растворы электролитов. Щелочные, солевые электролиты. Сепараторы. Ингибиторы коррозии. Неводные растворы электролитов. Растворители и соли. Полимеры. Гель-полимерные электролиты. Твердополимерные электролиты.

#### 11. Первичные элементы с водным электролитом

Элементы с цинковым анодом и щелочным электролитом. Электрические и эксплуатационные характеристики марганцево-цинковых и ртутно-цинковых элементов. Воздушно-металлические источники тока. Резервные источники тока. Наливные источники тока. Тепловые источники тока.

#### 12. Литиевые первичные элементы

Типы первичных литиевых ХИТ. Основные характеристики и параметры. Требования к активным материалам электродов, электролитам и растворителям. Влияние различных факторов на функционирование катода и анода. Основные проблемы батарей первичных элементов и пути их решения. Взрывопожаробезопасность. Новые катодные материалы. Современные технологии производства первичных элементов.

#### 13. Аккумуляторы

Типы аккумуляторов. Аккумуляторы с водным электролитом. Методы исследования. Проблемы анодов на основе металлического лития. Литий-ионный аккумулятор. Материалы отрицательного и положительного электродов. Взрывопожаробезопасность. Литий-полимерный аккумулятор. Твердофазные литиевые аккумуляторы. Аккумуляторы литий-сера, натрий-сера. Современные технологии производства аккумуляторов.

**Вопросы для самоконтроля и вопросы, включенные в билеты для проведения экзамена:**

1. Какие основные виды режимов разряда первичного элемента вы знаете?
2. Что такое величина емкости элемента и от каких факторов она зависит?
3. Какова особенность определения вольт-амперной характеристики первичного элемента по сравнению с топливным элементом и аккумулятором?
4. Какие стадии анодного и катодного процессов могут быть лимитирующими?
5. Дайте определение топливного элемента (ТЭ).
6. Какие типы топливных элементов вы знаете?
7. Каковы основные токообразующие процессы, протекающие на электродах в водородно-кислородном топливном элементе?
8. Почему напряжение топливного элемента ниже его ЭДС?
9. Из каких компонентов состоит электрохимический генератор на основе ТЭ?
10. На какие электроды ТЭ подаются топливо и окислитель?
11. Из каких компонентов состоит топливный элемент?
12. Способы хранения и транспорта водорода.
13. Классификация и примеры сплавов – накопителей водорода
14. Классификация и примеры сплавов – накопителей водорода
15. Требования к резервуарам для хранения водорода.
16. Использование низкотемпературных и высокотемпературных электролизеров и топливных элементов для сглаживания пиковых нагрузок в энергосистеме.
17. Энерготехнологические комплексы на основе водорода.
18. Кинетика электрохимических процессов.
19. Аккумуляция энергии возобновляемых источников.
20. Способы производства водорода.
21. Виды конверсии углеводородов.

## **ПРОМЕЖУТОЧНАЯ АТТЕСТАЦИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

Промежуточная аттестация проводится в форме экзамена.

### **Требования и критерии оценивания ответов экзамена**

В процессе экзамена оценивается уровень научно-исследовательской компетентности аспиранта, что проявляется в квалифицированном представлении результатов обучения.

При определении оценки учитывается грамотность представленных ответов, стиль изложения и общее оформление, способность ответить на поставленный вопрос по существу.

Критерии выставления оценки на экзамене:

Оценка «ОТЛИЧНО» выставляется аспиранту, который показал при ответе на вопросы экзаменационного билета и на дополнительные вопросы, что владеет материалом изученной дисциплины, свободно применяет свои знания для объяснения различных явлений и решения задач.



Оценка «ХОРОШО» выставляется аспиранту, в основном правильно ответившему на вопросы экзаменационного билета и на дополнительные вопросы, но допустившему при этом не принципиальные ошибки.

Оценка «УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО» выставляется аспиранту, который в ответах на вопросы экзаменационного билета допустил существенные и даже грубые ошибки, но затем исправил их сам

Оценка «НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО» выставляется аспиранту, который:

- а) не ответил на вопросы экзаменационного билета
- б) при ответе на дополнительные вопросы обнаружил незнание большого раздела экзаменационной программы.

### **УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

Основная литература:

1. Багоцкий В.С., Скундин А.М. Химические источники тока. М.: Энергоиздат, 1981.
2. Коровин Н.В. Топливные элементы и электрохимические энергоустановки. Москва, МЭИ, 2005, 278 с.
3. Прикладная электрохимия / Под ред. А.Л. Ротиняна. 3-е изд. Л.:Химия, 1974.
4. Прикладная электрохимия / Под ред. Н.Т. Кудрявцева. 2-е изд. М.:Химия, 1975.
5. Пуцылов И.А, Смирнов К.С., Егоров А.М., Смирнов С.Е. Перспективные электродные материалы литиевых источников тока. М.2015. Изд-во «Компания Спутник+».88 с.

Дополнительная литература:

1. Смирнов С.Е. Полимерные электролиты литиевых источников тока. Москва. Изд-во «Компания Спутник+».2007.64 с.
2. Смирнов С.Е., Пуцылов И.А., Смирнов С.С. Твердофазные литиевые источники тока. Москва. Изд-во «Компания Спутник+».2010. 77 с .
3. Кулешов Н.В., Григорьев С.А., Фатеев В.Н. Электрохимические энергоустановки для водородной энергетики, МЭИ, 2007.67с.
4. Смирнов С.Е., Пуцылов И.А. Теоретическая электрохимия. Лабораторный практикум. М.: Издательский дом МЭИ, 2010.- 26 с
5. Смирнов С.Е., Пуцылов И.А. Теоретическая основы химических источников тока. Лабораторный практикум. М.: Издательский дом МЭИ, 2017.- 32 с.

Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение: *(программное обеспечение, на которое кафедра или МЭИ имеет лицензию, а также свободно распространяемое программное обеспечение)*

Интернет-ресурсы, включая профессиональные базы данных и информационные справочные системы:

Университетская информационная система «РОССИЯ»  
<https://uisrussia.msu.ru>

Справочно-правовая система «Консультант+» <http://www.consultant-urist.ru>

Справочно-правовая система «Гарант» <http://www.garant.ru>

База данных Web of Science <https://apps.webofknowledge.com/>

База данных Scopus <https://www.scopus.com>

Портал открытых данных Российской Федерации <https://data.gov.ru>

База открытых данных Министерства труда и социальной защиты РФ  
<https://rosmintrud.ru/opendata>

База данных Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU  
<https://elibrary.ru/>

База данных профессиональных стандартов Министерства труда и социальной защиты РФ  
<http://profstandart.rosmintrud.ru/obshchiy-informatsionnyy-blok/natsionalnyy-reestr-professionalnykh-standartov/>

Базы данных Министерства экономического развития РФ  
<http://www.economy.gov.ru>

База открытых данных Росфинмониторинга <http://www.fedsfm.ru/opendata>

Электронная база данных «Издательство Лань» <https://e.lanbook.com>

Федеральная государственная информационная система «Национальная электронная библиотека» <https://нэб.рф>

Национальный портал онлайн обучения «Открытое образование»  
<https://openedu.ru>

Электронная база данных "Polpred.com Обзор СМИ"  
<https://www.polpred.com>

Официальный сайт Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии <http://protect.gost.ru/>

Электронная библиотека МЭИ <https://ntb.mpei.ru/e-library/index.php>.

#### ПРОГРАММУ СОСТАВИЛ:

профессор кафедры химии и  
электрохимической энергетики  
д.т.н., профессор

С.Е. Смирнов

Заведующий кафедрой химии и  
электрохимической энергетики  
д.т.н., профессор

Н.В. Кулешов

Директор ИЭВТ  
к.т.н., доцент

И.А. Щербатов