

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе

  
\_\_\_\_\_ Драгунов В.К.

«16» июня 2015 г.

Программа аспирантуры

Направление 13.06.01 Электро- и теплотехника

Направленность (специальность) 05.14.12 Техника высоких напряжений

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

дисциплины по выбору

«Специальные вопросы физики электрического разряда в газах, жидких и твёрдых диэлектриках»

Индекс дисциплины по учебному плану: Б1.В.ДВ.4.2

Всего: 108 часов

Семестр 7,

в том числе 6 часов – контактная работа,  
84 часов – самостоятельная работа,  
18 часов – контроль

Программа составлена на основе федерального государственного образовательного стандарта высшего образования (уровень подготовки кадров высшей квалификации) по направлению подготовки

13.06.01 Электро- и теплотехника,

код и название направления

утвержденного приказом Минобрнауки России от 30 июля 2014 г. № 878, и паспорта специальности, указанной в номенклатуре специальностей научных работников

05.14.12 Техника высоких напряжений,

шифр и название специальности

утвержденной приказом Минобрнауки России от 25 февраля 2009 г. № 59.

## **ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

**Целью** изучения дисциплины является освоение системы современных научных знаний в области физики электрического разряда в газах, жидких и твердых диэлектриках.

**Задачами** дисциплины являются:

– освоение системы современных знаний об электрофизических процессах в газовой, жидкой и твердой изоляции, сопровождающих электрические разряды, о протекающих в электрическом поле электрофизических процессах в жидких и твердых диэлектриках, механизмах их пробоя и старения;

– освоение современных математических моделей стадий электрического разряда;

– изучение методов экспериментального исследования разрядной плазмы;

– изучение методов расчета и анализа параметров названных стадий и форм разряда при помощи освоенных моделей;

**В** процессе освоения дисциплины **формируются следующие компетенции:**

– способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях (УК-1).

– способность проектировать и осуществлять комплексные исследования, в том числе междисциплинарные, на основе целостного системного научного мировоззрения с использованием знаний в области истории и философии науки (УК-2).

– способность планировать и решать задачи собственного профессионального и личностного развития (УК-6).

– владение методологией теоретических и экспериментальных исследований в области профессиональной деятельности (ОПК-1).

– способность к разработке новых методов исследования и их применению в самостоятельной научно-исследовательской деятельности в области профессиональной деятельности (ОПК-3).

– готовность к преподавательской деятельности по основным образовательным программам высшего образования (ОПК-5).

– способность к экспериментальным и теоретическим исследованиям электрических разрядов и электрофизических процессов в различных средах, а также в изоляции установок, устройств и аппаратов высокого напряжения (ПК-1).

– готовность к разработке и использованию электроэнергетических, электротехнологических, электрофизических и испытательных установок высокого напряжения (ПК-3).

– способность к экспериментальным и теоретическим исследованиям воздействия электрических разрядов, сильных электрических и магнитных полей на дисперсные системы, твердые и жидкие материалы (ПК-4).

– владение современными методами и средствами расчета электрических и магнитных полей, диагностики изоляции и испытания оборудования высокого напряжения (ПК-7).

## **ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАЗОВАНИЯ, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

В результате освоения дисциплины обучающийся должен демонстрировать следующие результаты образования:

### **знать:**

- современное состояние проблемы описания электрофизических процессов в газовой изоляции (ПК-1);
- теоретические основы физики плазмы применительно к описанию разрядных явлений в газообразных диэлектриках (ПК-1);
- особенности формирования разрядных процессов в элегазовой и вакуумной изоляции (ПК-1);
- физические механизмы влияния конструктивных и технологических факторов на разрядные процессы в изоляции из жидких диэлектриков (ПК-3);
- современные теории электрического и теплового пробоя твердых диэлектриков (ПК-1);
- особенности возникновения и существования частичных разрядов при характерных дефектах изоляционных конструкций и жидких и твердых электроизоляционных материалов (ПК-7);

### **уметь:**

- применять методы теоретического исследования плазмы электрического разряда (ПК-1);
- применять методы экспериментального исследования плазмы электрического разряда (ПК-1);
- разрабатывать физико-математические модели разрядных процессов в газах, жидких и твердых диэлектриках (ПК-9);

### **владеть:**

- методами расчетного определения электрической прочности электроизоляционных газовых промежутков (ПК-1).

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ ДИСЦИПЛИНЫ

### *1. Электрофизические процессы в газовой изоляции.*

Упругие и неупругие соударения частиц. Процессы в газе с захватом и отрывом электронов. Процессы в газе с участием фотонов. Характеристики коллективного движения частиц. Процессы на электродах и вблизи них.

### *2. Методы теоретического исследования разрядной плазмы.*

Кинетическое уравнение Больцмана для описания электронных процессов в плазме газового разряда. Уравнение для энергетического спектра электронов. Критерии справедливости уравнения по величине и частоте поля, по пространственной однородности, по степени ионизации. Энергетический спектр электронов в квантовой теории и в классической физике. Физико-математическое описание стримерной стадии электрического разряда. Теоретические и экспериментальные оценки характеристик стримеров в воздухе.

### *3. Методы экспериментального исследования разрядной плазмы.*

Электрические зонды. Вольт-амперная характеристика одиночного зонда. Нахождение функции распределения электронов, техника измерения. Двойные зонды. Измерение параметров плазмы и электрического поля. Оценка электронной температуры по электронному току на зонд. Измерение распределения потенциала.

### *4. Современное состояние теории электрического разряда в длинных воздушных промежутках.*

Электрическая прочность внешней изоляции при воздействии грозových и коммутационных импульсов. Феноменология лидерных разрядов при положительной и отрицательной полярности электродов с малым радиусом кривизны. Влияние на разрядные напряжения абсолютной влажности воздуха, дождя, степени неоднородности электрического поля, формы импульсного воздействия. Вольт-секундные характеристики разрядных промежутков. Решение практических задач с использованием метода критического коэффициента неоднородности электрического поля.

### *5. Электрические разряды в элегазовой изоляции.*

Феноменология и характеристики стримерных и лидерных процессов в элегазе. Результаты экспериментальных исследований. Методы оценки разрядных напряжений в элегазовой изоляции. Влияние агрегатного состояния элегаза и давления на разрядное напряжение. Перспективы применения жидкого элегаза в качестве изоляционной среды в электрических аппаратах сверхвысокого и ультравысокого напряжения.

### *6. Электрические разряды в вакуумной изоляции.*

Электрические характеристики вакуумных промежутков. Тренировка электродов. Давление остаточного газа. Инициирование разряда за счет процессов электронной эмиссии. Критерии разряда, инициируемого у катода и анода. Влияние микрочастиц на электрическую прочность вакуумных промежутков. Перекрытие по поверхности твердых диэлектриков в вакууме.

### *7. Физические процессы формирования электрических разрядов в жидких диэлектриках.*

Динамика формирования и параметры канала разряда в жидких диэлектриках в условиях резконеоднородного электрического поля. Динамика развития лидерного разряда в жидкостях. Влияние барьеров, уровня и полярности напряжений, степени неоднородности электрического поля. Перспективы прогнозирования пробивного напряжения трансформаторных масел в изоляции силовых трансформаторов и реакторов. Механизмы развития разрядов в сложных изоляционных системах. Влияние изолирования электродов на параметры электрических разрядов в трансформаторном масле. Влияние примесей и эмульгированной влаги.

### *8. Физические процессы формирования электрических разрядов в твердых диэлектриках.*

Современные экспериментальные данные по электрическому пробую твердых диэлектриков. Теории электрического и теплового пробоя. Классификация дефектов изоляции и соответствующие им механизмы возникновения и формирования частичных разрядов в твердых изоляционных

материалах. Изменение электрической прочности твердых диэлектриков при длительном воздействии напряжения.

## **ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОСВОЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБРАЗОВАНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

Промежуточная аттестация по итогам освоения дисциплины:

7 семестр – дифференцированный зачет.

### **Вопросы для самоконтроля и проведения зачета**

#### Вопросы для самоконтроля

1. От каких параметров газа зависит и как рассчитывается средняя длина свободного пробега заряженных частиц в газе?
2. Как определяется эффективное сечения взаимодействия частиц?
3. Выведите формулу для определения коэффициента диффузии молекул газа.
4. Какая доля энергии электрона передается молекуле или иону при упругом и неупругом взаимодействиях?
5. Укажите основные механизмы образования отрицательных ионов в газе.
6. Поясните зависимость частоты ион-ионной рекомбинации от давления газа.
7. Что такое амбиполярная диффузия?
8. Поясните процессы термоэлектронной и автоэлектронной эмиссии электронов с катода.
9. Как зависит выход электронов от состояния поверхности катода?
10. В чем проявляется отличие в поведении плазмы во внешних электрическом и магнитном полях от поведения отдельных заряженных частиц?
11. Каковы основные особенности дрейфовой скорости?

12. Каково основное свойство плазмы, находящейся во внешнем электрическом поле?

13. Каковы основные особенности не полностью ионизованной плазмы по сравнению с полностью ионизованной?

14. Сформулируйте теорему Лиувилля.

15. Почему функция распределения электронов зависит от направления скорости?

16. Сформулируйте критерии справедливости уравнения для энергетического спектра электронов.

17. Постройте качественно вольт-амперную характеристику одиночного зонда.

18. Сформулируйте критерий «разреженности» плазмы.

19. Поясните технику измерения функции распределения наложением небольшого переменного напряжения.

20. Перечислите стадии лидерного разряда в длинном воздушном промежутке при воздействии коммутационного импульса.

21. Что такое критическая длительность фронта, чем она обусловлена?

22. Что такое критический коэффициент неоднородности электрического поля? Как он применяется для расчета разрядных напряжений?

23. В чем сходство и отличие стримерных и лидерных разрядов в азоте и в элегазе?

24. Как агрегатное состояние элегаза и давление влияют на разрядное напряжение?

25. Сформулируйте критерии разряда, инициируемого в вакууме у катода и анода.

26. Что такое тренировка электродов?

27. Поясните процессы электронной эмиссии при разряде в вакуумном изоляционном промежутке.

28. Перечислите факторы, влияющие на динамику лидерного разряда в жидкостях.

29. Какие факторы влияют на разрядные напряжения в масло-барьерной изоляции?

30. Сформулируйте основные положения теорий электрического и теплового пробоя твердых диэлектриков.

31. Перечислите дефекты в жидкой и твердой изоляции, приводящие к возникновению частичных разрядов.

#### Вопросы, включенные в билеты для проведения зачетов

1. Электрофизические процессы в газовой изоляции. Упругие и неупругие соударения частиц. Процессы в газе с захватом и отрывом электронов.

2. Электрофизические процессы в газовой изоляции. Процессы в газе с участием фотонов.

3. Электрофизические процессы в газовой изоляции. Характеристики коллективного движения частиц. Процессы на электродах и вблизи них.

4. Кинетическое уравнение Больцмана для описания электронных процессов в плазме газового разряда.

5. Уравнение для энергетического спектра электронов. Критерии справедливости уравнения по величине и частоте поля, по пространственной однородности, по степени ионизации. Энергетический спектр электронов в квантовой теории и в классической физике.

6. Физико-математическое описание стримерной стадии электрического разряда. Методы численного моделирования стримеров. Теоретические и экспериментальные оценки характеристик стримеров в воздухе.

7. Электрические зонды. Вольт-амперная характеристика одиночного зонда.

8. Экспериментальное нахождение функции распределения электронов, техника измерения.

9. Измерение параметров плазмы и электрического поля. Оценка электронной температуры по электронному току на зонд. Измерение распределения потенциала.

10. Электрическая прочность внешней изоляции при воздействии грозových и коммутационных импульсов. Феноменология лидерных разрядов при положительной и отрицательной полярности электродов с малым радиусом кривизны.

11. Влияние на разрядные напряжения в длинных воздушных промежутках абсолютной влажности воздуха, дождя, степени неоднородности электрического поля, формы импульсного воздействия. Вольт-секундные характеристики разрядных промежутков.

12. Расчет электрической прочности длинных воздушных промежутков при воздействии коммутационного импульса с использованием метода критического коэффициента неоднородности электрического поля.

13. Феноменология и характеристики стримерных и лидерных процессов в элегазе. Результаты экспериментальных исследований.

14. Методы оценки разрядных напряжений в элегазовой изоляции.

15. Влияние агрегатного состояния элегаза и давления на разрядное напряжение. Перспективы применения жидкого элегаза в качестве изоляционной среды в электрических аппаратах сверхвысокого и ультравысокого напряжения.

16. Электрические характеристики вакуумных промежутков. Тренировка электродов. Давление остаточного газа. Инициирование разряда за счет процессов электронной эмиссии.

17. Критерии разряда, иницируемого в вакууме у катода и анода. Влияние микрочастиц на электрическую прочность вакуумных промежутков.

18. Перекрытие по поверхности твердых диэлектриков в вакууме.

19. Динамика формирования и параметры канала разряда в жидких диэлектриках в условиях резконеоднородного электрического поля. Динамика развития лидерного разряда в жидкостях. Влияние барьеров, уровня и полярности напряжений, степени неоднородности электрического поля.

20. Перспективы прогнозирования пробивного напряжения трансформаторных масел в изоляции силовых трансформаторов и реакторов.

21. Механизмы развития разрядов в сложных изоляционных системах. Влияние изолирования электродов на параметры электрических разрядов в трансформаторном масле. Влияние примесей и эмульгированной влаги.

22. Современные экспериментальные данные по электрическому пробоям твердых диэлектриков. Теории электрического и теплового пробоя.

23. Классификация дефектов твердой изоляции и соответствующие им механизмы возникновения и формирования частичных разрядов. Изменение электрической прочности твердых диэлектриков при длительном воздействии напряжения.

Критерии оценки за освоение дисциплины определены в Инструктивном письме И-23 от 14 мая 2012 г.

## **РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА**

### **Основная литература:**

1. Электрофизические основы техники высоких напряжений. Учебник для вузов / Под ред. И.П. Верещагина // М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – 704 с.

2. Ю.П. Райзер. Физика газового разряда // М.: Интеллект, 2009. – 736 с.

3. Е. Куффель, В. Цаенгль, Дж. Куффель. Техника и электрофизика высоких напряжений / Пер. с англ.: Учебно-справочное руководство // Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2011. – 520 с.

9. Н.В. Щеглов. Современные виды изоляции. Часть 3. Вакуумная изоляция // Новосибирск: издательство НГТУ, 2011. – 94 с.

10. Н.В. Щеглов. Современные виды изоляции. Часть 4. Изоляция силовых трансформаторов // Новосибирск: издательство НГТУ, 2011. – 88 с.