

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) 05.09.10 Электротехнология

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

дисциплины по выбору

«Теория нагрева электрической дугой»

Индекс дисциплины по учебному плану: Б1.В.ДВ.2.1

Всего: 108 часов

Семестр 3, в том числе

6 часов – контактная работа,  
84 часа – 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, утвержденного приказом министерства образования и науки РФ от 30 июля 2014 № 878, и паспорта специальности 05.09.10 «Электротехнология» номенклатуры специальностей научных работников, утвержденной приказом Минобрнауки России от 25 февраля 2009 г. № 59.

### **ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

**Целью** изучения дисциплины является освоение подходов к применению теории нагрева электрической дугой к созданию, моделированию и исследованию электротехнологических установок и комплексов.

**Задачами** дисциплины являются:

– изучение основных физических закономерностей, качественных и количественных характеристик и областей применения процессов нагрева электрической дугой;

– приобретение навыков применения теории и математических методов теплообменной модели электрической дуги к разработке инновационных электротехнологических процессов;

– овладение методологией теоретических и экспериментальных исследований в области нагрева электрической дугой.

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

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

– способность к применению теории электротехнологических процессов в профессиональной деятельности (ПК-1);

– владение методами математического и физического моделирования электротехнологических процессов и установок (ПК-2);

– способность к применению теории современных конструкционных материалов и их взаимодействия с электромагнитным полем и концентрированными потоками энергии в профессиональной деятельности (ПК-4).

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

В результате освоения дисциплины обучающийся должен демонстрировать **следующие результаты образования:**

### **знать:**

– основные физические закономерности, качественные и количественные характеристики и области применения нагрева электрической дугой в электротехнологии (ПК-1);

– математические методы и способы применения программного обеспечения в расчетах электрических, тепловых и энергофизических характеристик нагрева электрической дугой в электротехнологических установках (ПК-2);

### **уметь:**

– применять теорию и математические методы теплообменной модели электрической дуги к разработке инновационных электротехнологических процессов (ПК-1);

– применять теорию нагрева электрической дугой и модифицировать ее методы в проектировании современных электротехнологических установок и системах в области машиностроения, энергетики и металлургии (ПК-4);

### **владеть:**

– методологией теоретических и экспериментальных исследований в области нагрева электрической дугой (ОПК-1);

– методами математического моделирования процессов и установок нагрева электрической дугой (ПК-2).

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ ДИСЦИПЛИНЫ**

### ***1. Введение в теорию термической плазмы***

Трехкомпонентная модель плазмы. Кинетические характеристики плазмы. Понятие сечения столкновения. Расчет эффективных сечений столкновения электронов с атомами и ионами. Упругие и неупругие столкновения.

Физическая модель процессов рассеяния энергии электрического поля в плазме. Равновесная и неравновесная плазма. Функции распределения Максвелла и Больцмана. Понятие термической плазмы. Локальное термодинамическое равновесие плазмы. Расчет степени ионизации и концентрации частиц термической плазмы. Дрейф электронов и ионов в термической плазме. Коэффициенты подвижности электронов и ионов. Простейшие модели расчета коэффициентов переноса в равновесной плазме. Теплофизические характеристики плазмообразующих газов, применяемых в электротехнологии при давлениях от  $10^4$ - $10^6$  Па. Явление распада плазмы в вакуумных плазменных печах (ВПП). Явление убегания электронов и деформация функции распределения электронов в сильно неравновесной плазме ВПП.

## ***2. Физико-математические основы нагрева электрической дугой***

Физические схемы теплообмена дуги в рабочих процессах электротехнологических установок (ЭТУ). Физические проблемы теплообмена дуги с окружающей средой в ЭТУ. Физическое и математическое определение поверхности столба электрической дуги. Понятие теплового и механического пограничного слоя на поверхности столба дуги. Консервативный характер процесса нагрева электрической дуги. Основные понятия теории турбулентности и гидродинамической устойчивости. Условия стабильности, природа и характеристики гидродинамических возмущений поверхности столба дуги. Двухслойная гидродинамическая структура дуги. Ламинарное ядро и внешний вязкий пограничный слой. Физическое обоснование бесконвективной модели столба в отдалении от катода длинной дуги. Магнитогидродинамическая модель дуги Г. Меккера. Движение плазмы и конвективное рассеяние энергии электрического поля в плазме столба вблизи катодного пятна. Общая теплообменная структура дуги в ЭТУ. Консервативная (цилиндрическая) и конвективная (конусная) части столба дуги. Физические предпосылки построения теплообменной модели электрической дуги (ТОМЭД).

### ***3. Физико-математические условия построения теплообменной модели электрической дуги (ТОМЭД) в электротермических установках***

Принцип суперпозиции энергетических потоков в столбе дуги. Теория консервативной (цилиндрической) части столба электрической дуги. Решение дифференциального уравнения энергии столба и расчет профиля температуры в относительном радиусе цилиндрического столба. Математический принцип формирования теплофизических универсальных функций дуги. Преобразование интегрального уравнения энергии консервативной части столба дуги с помощью универсальных функций. Уравнения радиуса и напряженности электрического поля цилиндрической части столба. Метод универсальных теплофизических функций дуги в расчете базисных тепловых и электрических характеристик ТОМЭД.

### ***4. Методы идентификации ТОМЭД на основе внешних электрических характеристик дуги ЭТУ с конкретными условиями процессов теплообмена***

Базисные электрические и тепловые характеристики ТОМЭД как математическая основа идентификации модели для конкретных условий теплообмена дуги в ЭТУ. Методы идентификации параметров конусной части столба с учетом сильного термического неравновесия плазмы вблизи катода. Связь параметров конусной части столба с эмиссионными процессами в катодном пятне дуги. Функции распределения напряженности электрического поля и радиуса столба вдоль оси электрической дуги. Структурные параметры ТОМЭД и методы их идентификации на основе внешних электрических характеристик ЭТУ.

## ***5. Теплообменная модель дуги и методы расчета электрических и тепловых режимов нагрева электрической дугой в ЭТУ***

Теплообменная модель дуги в дуговых печах постоянного тока. Методы идентификации модели на основе экспериментальных ВАХ дуговых печей. Условия подобия теплообменной структуры дуги и расчет режимов нагрева дугой в процессе плавки металла. ТОМЭД дуговых сталеплавильных печей переменного тока (ДСП). Основы проектирования электрических и тепловых режимов электронагрева в ДСП. Многофакторная нелинейная функция градиента напряжения дуги ДСП и критерий устойчивости регулятора мощности по перемещению электрода. ТОМЭД плазменно-дуговых печей (ПДП). Методы идентификации модели на основе экспериментальных ВАХ ПДП. Расчет электрических и тепловых характеристик ПДП. ТОМЭД дуговых струйных плазмотронов (ПДС). Методы идентификации модели на основе экспериментальных ВАХ ПДС. Расчет электрических и тепловых характеристик ПДС.

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

Промежуточная аттестация по итогам освоения дисциплины:

3 семестр – дифференцированный зачет.

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

1. Термодинамическое и термическое равновесие плазмы. Понятие и свойства термической плазмы. Модель трехкомпонентной плазмы. Функции распределения Максвелла и Больцмана
2. Неупругие столкновения электронов в термической плазме. Возбуждение атомов и излучение плазмы. Пояснить отличие в расчете излучения резистивного нагревателя и столба электрической дуги.
3. Пояснить порядок расчета степени ионизации термической плазмы столба электрической дуги.

4. Причины термического неравновесия плазмы. Расчет степени термического неравновесия плазмы дугового разряда.
5. Значение и принципы пространственной стабилизации дуги в ЭТУ. Понятие длины дуги. Способ нахождения функций напряженности дуговых печей по экспериментальным ВАХ.
6. Физическое обоснование влияния теплового режима графитированных электродов на электрические и тепловые характеристики дуговых печей. Электроды среднего, высокого и сверхвысокого качества и области их применения.
7. Дать интерпретацию экспериментальным исследованиям, доказывающим консервативные свойства столба длинной электрической дуги. Пояснить физический смысл результатов этих исследований.
8. Физическая модель Меккера движения плазмы в столбе электрической дуги. Пояснить физический смысл и практическое значение формулы Меккера для скорости движения плазмы в столбе дуги.
9. Дать физическую интерпретацию сильного неравновесия плазмы столба вблизи катодного пятна дуги. Графики сильного расслоения температур электронов и атомарной компоненты плазмы вблизи катодного пятна дуги. Проблемы моделирования столба вблизи катода.
10. Виды и основные характеристики механизма эмиссии электронов с поверхности катода электрической дуги. Дать физическое и практическое обоснование выбора материала катода в ЭТУ с нагревом электрической дугой.
11. Физическая структура столба дуги в виде конусной и цилиндрической частей. Пояснить особенности и структуру теплообменных процессов дуги с окружающей средой для обеих частей столба.
12. Физическая структура слоя прикатодного падения электрического потенциала в электрической дуге. Характеристики прикатодного падения напряжения дуги пояснить их физический смысл и влияние на процессы нагрева в дуговых печах.

13. Теплоотдача при естественной конвекции в неограниченном пространстве и возможности применения её теории для описания процессов теплообмена дуги с окружающей средой в плавильной ванне дуговой печи.
14. Пояснить расчет коэффициента интенсивности теплообмена дуги и его зависимости от периода плавки в дуговых печах на основе формулы критерия Нуссельда для естественной конвекции в неограниченном пространстве при турбулентном режиме.
15. Динамические ВАХ дуги ДСП. Вид ДВАХ и их влияние на искажение кривых тока и напряжения в ДСП.
16. Пояснить физические причины формирования динамических ВАХ дуги в ДСП.
17. Пояснить физические причины появления вентильного эффекта в дугах ДСП. Влияние постоянной составляющей в кривой напряжения и тока дуги ДСП на режим работы электрооборудования.
18. Учет влияния на граничные функции теплопроводности ТОМЭД ДСП изменения условий теплообмена дуг в процессе плавки.
19. Расчет тепловых потерь в стенке разрядного канала струйного плазмотрона.
20. Расчет тепловых потерь в стенке канала анода-сопла струйного плазмотрона.
21. Пояснить физические условия образования двойной дуги в секционированном канале разрядной камеры струйного плазмотрона.
22. Изложить метод расчета распределения напряженности электрического поля по длине разрядного канала струйного плазмотрона.
23. Алгоритм и процедуры расчета ВАХ струйного плазмотрона по Граничные функции теплопроводности ТОМЭД.
24. Принцип формирования функций дуги конкретной ЭТУ. Физический смысл функций и их значение в проектировании электрического нагрева в дуговых печах.

25. Граничная функция теплопроводности в начальном сечении столба ТОМЭД. Физический смысл функции и её значение в формировании ТОМЭД.
26. Пояснить физические условия преобразования дифференциального уравнения энергии цилиндрической части столба дуги к уравнению Эленбасса-Хеллера.
27. Аналитическое решение уравнения Эленбасса-Хеллера ТОМЭД методом линеаризации Меккера.
28. Метод преобразования линейного решения уравнения Эленбасса-Хеллера с учетом нелинейного вида «вещественной» функции термической плазмы  $\sigma(S)$ .
29. Практический метод формирования универсальных теплофизических функций дуги на основе нелинейного решения уравнения Эленбасса-Хеллера для целей проектирования ЭТУ с нагревом электрической дугой.
30. Преобразование интегральных уравнений энергии и закона Ома цилиндрической части столба с помощью универсальных функций дуги. Вывод базовых формул для расчета характеристик цилиндрической части столба дуги.
31. Метод формирования и процедура расчета граничных функций теплопроводности ТОМЭД на основе базовых формул цилиндрической части столба дуги на основе функций напряженности, полученных с помощью экспериментальных ВАХ дуговых печей.
32. Пояснить физический смысл и математическое представление структурной функции геометрической неоднородности ТОМЭД.
33. Пояснить физический смысл и математическое представление структурной функции электропроводности неравновесной плазмы конусной части столба ТОМЭД.
34. Пояснить физический смысл и математическое представление структурной функции электрической неоднородности ТОМЭД. Метод её

- расчета и математическая связь с вольтовым эквивалентом конвективного потока тепла, создаваемого дугой.
35. Вывести формулу функции градиента напряжения дуги ДСП на основе структурной функции электрической неоднородности ТОМЭД.
  36. Записать формулу функции градиента напряжения дуги ДСП на основе структурной функции электрической неоднородности ТОМЭД. Пояснить многофакторность функции и её практическое значение в проектировании ДСП.
  37. Написать процедуру расчета функции градиента напряжения дуги ДСП при условии задания напряжения, тока и приэлектродного падения напряжения дуги.
  38. Изобразить вид функции градиента напряжения дуги ДСП, рабочей характеристики напряжения дуги и на их основе вид функции положения электрода в зависимости от тока ДСП. Пояснить понятие критического тока в работе ДСП.
  39. Дать обоснование формул граничных функций теплопроводности ТОМЭД, учитывающих влияние интенсивности теплообмена дуги в плавильной ванне дуговых печей.
  40. Дать обоснование формул структурных функций ТОМЭД, учитывающих влияние интенсивности теплообмена дуги в плавильной ванне дуговых печей.
  41. Формула длины конусной части столба дуги. Пояснить влияние этой длины и отношения длины конусной части столба к общей длине дуги на электрические и тепловые характеристики дуги в дуговых печах.
  42. Дать физическое обоснование методике расчета тепловых потоков, генерируемых дугой в ЭТУ. Структура потоков тепла и её зависимость от условий работы дуговых печей.
  43. Дать вывод основных формул расчета характеристик цилиндрической части столба дуги.

44. Записать процедуру расчета длины дуги при заданных граничных и структурных функциях ТОМЭД и заданном напряжении и токе дуги в дуговой печи.
45. Записать все граничные и структурные функции, необходимые для расчета длины дуги и средней напряженности электрического поля столба дуги при заданном напряжении и токе дуги в дуговой печи.
46. Учет влияния диаметра электрода, его теплового режима в ванне печи на результаты расчета электрических и тепловых характеристик дуги в дуговых печах.

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

## **РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА**

### **Основная литература:**

1. Франк-Каменецкий Д.А. Лекции по физике плазмы. – Долгопрудный: Интеллект, 2008. 280 с.
2. Домаров П. В., Мелешко А. А. Установки специального электронагрева: учебное пособие. – Новосибирск: НГТУ, 2012. 76 с.

### **Дополнительная литература:**

3. Электротехнический справочник: В 4 т. Т.4. Использование электрической энергии. / Под общ. ред. профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др. (гл. ред. А.И. Попов). – М.: Издательство МЭИ, 2002. 696 с.
4. Чередниченко В.С., Юдин Б.И. Вакуумные плазменные электропечи. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. 586с.

5. Электрические промышленные печи. Дуговые печи и установки специального нагрева. Учеб. для вузов / А.Д. Свенчанский, И.Т. Жердев, А.М. Кручинин и др. М.: Энергоиздат, 1981. 296 с.