

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
**ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР**  
**«КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»**  
(ФИЦ КНЦ РАН)

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора  
ФИЦ КНЦ РАН по научной работе,  
кандидат биологических наук



Е.А. Боровичев

15 марта 2022 г.

**ПРОГРАММА**  
**ВСТУПИТЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПО СПЕЦИАЛЬНОЙ**  
**ДИСЦИПЛИНЕ**

Образовательная программа высшего образования – программа подготовки  
научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре  
научная специальность – **2.4.4 Электротехнология и электрофизика**

Апатиты  
2022

## ВВЕДЕНИЕ

Программа предназначена для поступающих в аспирантуру ФИЦ КНЦ РАН по научной специальности 2.4.4 Электротехнология и электрофизика.

Поступающий должен показать знания программного содержания теоретических дисциплин, иметь представление о фундаментальных работах и публикациях периодической печати в избранной области, ориентироваться в проблематике дискуссий и критических взглядов ведущих ученых по затрагиваемым вопросам, уметь логично излагать материал, показать навыки владения исследовательским аппаратом применительно к области специализации и сфере деятельности.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СДАЧЕ ВСТУПИТЕЛЬНОГО ЭКЗАМЕНА В АСПИРАНТУРУ

*Поступающие в аспирантуру должны продемонстрировать:*

- глубокие теоретические знания в области избранной научной дисциплины;
- достаточно полное представление об источниках, фундаментальных работах и последних достижениях науки в данной области;
- способность ориентироваться в дискуссионных проблемах избранной отрасли науки;
- способность владением понятийно-исследовательским аппаратом применительно к области специализации;
- умение логично, аргументировано излагать материал.

## КРИТЕРИИ ЭКЗАМЕНАЦИОННОЙ ОЦЕНКИ

Оценка "отлично" ставится, если абитуриент:

- дает исчерпывающий ответ, демонстрирует знание альтернативных точек зрения по анализируемой проблеме, отечественного и зарубежного опыта;
- владеет современной нормативной базой, умеет раскрыть роль анализируемого явления в российской и мировой экономике;
- умеет аргументировать свою точку зрения, делать самостоятельные выводы и рекомендации;
- владеет научной терминологией и безошибочно раскрывает содержание используемых терминов, грамотно, литературно, логично излагает материал.

Оценка "хорошо" ставится, если абитуриент:

- дает полный ответ на поставленные вопросы, демонстрирует знание основных альтернативных точек зрения по анализируемой проблеме, отечественного и зарубежного опыта;
- владеет основными нормативными материалами по анализируемой проблеме;
- умеет оценить значение анализируемого явления для российской и мировой экономики;
- умеет аргументировать ключевые положения ответа, делать самостоятельные выводы и рекомендации;

- в целом владеет научной терминологией, но в отдельных случаях не может раскрыть содержание используемых терминов, грамотно, логично излагает материал. Допускается 1-2 незначительные ошибки, фактические и/или смысловые.

Оценка "удовлетворительно" ставится, если абитуриент:

- дает недостаточно полный ответ, демонстрирует знание отдельных, не всегда наиболее важных альтернативных точек зрения по анализируемой проблеме, не имеет системных представлений об отечественном и зарубежном опыте;
- не владеет основными нормативными материалами по анализируемой проблеме;
- испытывает серьезные затруднения при попытке оценить значение анализируемого явления для российской и мировой экономики;
- испытывает серьезные затруднения при попытках аргументировать ключевые положения ответа, сделать самостоятельные выводы и рекомендации;
- недостаточно владеет научной терминологией и часто испытывает затруднения при определении содержания используемых терминов;
- в целом способен логично изложить материал, однако допускает существенные ошибки с точки зрения логической последовательности.

Допускается не более 3-4 ошибок, фактических и/или смысловых.

Оценка "неудовлетворительно" ставится, если абитуриент:

- дает ответ, который носит фрагментарный характер, не знает альтернативных точек зрения по анализируемой проблеме, имеет поверхностные представления об отечественном и зарубежном опыте;
- не владеет нормативными материалами по анализируемой проблеме;
- не способен оценить значение анализируемого явления для российской и мировой экономики;
- не в состоянии аргументировать ключевые положения ответа, сделать самостоятельные выводы и рекомендации;
- не владеет научной терминологией, не способен определить содержание используемых терминов;
- не может логично изложить материал.

## **РАЗДЕЛЫ ДИСЦИПЛИНЫ, РАССМАТРИВАЕМЫЕ В ХОДЕ ИСПЫТАНИЯ**

### **1. Научно-технические основы электротехнологий**

Современные проблемы использования электрической энергии для технологических процессов. Основные виды продукции с предпочтительным производством на электротехнологических установках. Классификация электротехнологических установок. Электротехнологические установки с тепловым процессом формирования требуемого качества продукции. Основные методы преобразования электрической энергии в тепловую, их эффективность и распространенность в современных технологических процессах. Основные законы подобия и моделирования процессов в электротермических установках. Использование физического, математического и численного моделирования для решения

задач электрического нагрева и его оптимизации. Перспективные направления в использовании электроэнергии для технологических процессов.

## **2. Физические принципы и техническая реализация современных электротермических установок**

Эффект теплообразования при прохождении электрического тока по проводнику. Сопротивление проводника. Особенности тепловыделения в сопротивлении. Основные законы теплопередачи от нагревателя к объекту нагрева. Влияние геометрии рабочего пространства и третьих тел на теплопередачу. Основные методы расчета стационарных и нестационарных температурных полей. Решение тепловых задач с внутренними источниками теплоты.

Электрические печи сопротивления. Основные виды и конструкции электрических печей сопротивления. Печи прямого и косвенного нагрева, жидкостные ванны и печи с псевдокипящим слоем. Тепловой расчет печей периодического действия. Тепловой расчет печей непрерывного действия (методических). Расчет нагревательных элементов среднетемпературных и высокотемпературных печей. Особенности конструкции нагревателей с теплоотдачей преимущественно излучением. Особенности теплового расчета электрических печей с принудительной циркуляцией атмосферы. Расчет электрических нагревателей с преимущественно конвективной теплоотдачей. Особенности расчета вакуумных печей. Методы измерения и регулирования температуры в электрических печах.

Электрический дуговой разряд как источник тепла. Параметры электрической дуги высокого и низкого давления. Влияние внешней среды на процессы тепло- и массопереноса и процесс преобразования энергии в электрических дугах. Приэлектродные процессы в электрических дугах. Коронный, барьерный, тлеющий разряды. Методы расчета электрических цепей с дуговыми разрядами в контуре цепи. Вольтамперная характеристика электрической дуги постоянного и переменного тока. Устойчивость системы с дуговым разрядом. Устойчивость дугового разряда при наличии возмущений. Влияние материала электродов и среды на устойчивость дугового разряда.

Плазма и ее разновидности. Особенности использования низкотемпературной плазмы в электротехнологических установках. Дуговые и высокочастотные плазмотроны. Вакуумные плазменные печи с полым катодом.

Дуговые печи прямого и косвенного действия. Особенности теплообразования и теплопередачи в дуговых печах. Технологические процессы выплавки стали в дуговых печах. Расчет электрических процессов в дуговой печи. Тепловой расчет и энергетический баланс процессов в дуговой печи. Источники питания и электрооборудование дуговой печи. Расчет и проектирование коротких сетей. Дуговая печь как нагрузка электрической сети. Современные тенденции в развитии систем электропитания и повышении энергетической эффективности дуговых печей.

Особенности тепловых процессов в рудно-термических (рудовосстановительных) печах. Область применения, классификация и типы рудовосстановительных печей. Источники питания, электрооборудование, методы электрического расчета энергетического баланса рудовосстановительных печей. Перспективные направления совершенствования тепловых и энергетических процессов в технологиях рудовосстановительных печей.

Вакуумные дуговые печи. Особенности технологических процессов плавки в вакуумных дуговых печах.

Установки электрошлакового переплава. Особенности технологических процессов электрошлакового переплава.

Перенос и преобразование энергии в электромагнитном поле. Плоская электромагнитная волна, поверхностный эффект. Процесс взаимодействия электромагнитного поля с металлом. Электромагнитные явления в металлах с постоянной магнитной проницаемостью. Физические основы индукционного нагрева. Методы расчета систем «индуктор - загрузка». Коэффициент полезного действия и коэффициент мощности системы «индуктор - загрузка». Электродинамические процессы в ферромагнитных телах. Механические усилия в электродинамических системах. Взаимодействия электромагнитного поля с плазмой и расплавленным металлом.

Канальные и тигельные индукционные плавильные печи. Расчет основных параметров тигельной и канальной печей. Магнитогидродинамические процессы в ванне печи. Электродинамические явления в каналах печей. Энергетический баланс установки. Источники питания и электрооборудование тигельных и канальных печей.

Установки индукционного нагрева промышленной, средней и высокой частоты. Установки сквозного нагрева. Выбор основных параметров установок сквозного нагрева. Источники питания и электрооборудование на средних частотах. Индукционная поверхностная закалка. Выбор основных параметров установок индукционной закалки. Ламповые генераторы. Режимы работы ламповых генераторов. Высокочастотный и сверхвысокочастотный нагрев диэлектриков и полупроводников. Установки зонной плавки.

Электронно-лучевые печи для переплава особо чистой стали и тугоплавких материалов. Мощные электронные пушки. Характеристики оптической системы электронных пушек. Электронные установки зонной очистки металлов и выращивание монокристаллов. Электронно-лучевые установки для нанесения покрытий. Энергетические характеристики электронно-лучевых установок.

### **3. Процессы и установки для сварки и улучшения свойств материалов**

Электродуговая сварка. Особенности формирования сварочных дуг. Источники питания сварочных дуг. Плазменно-дуговая сварка и резка металлов. Физические основы плазменной сварки и резки металлов. Контактная сварка. Физические основы электрической контактной сварки. Стыковая сварка. Точечная сварка. Шовная сварка. Электрооборудование установок контактной сварки.

Плазменная техника и технология. Основные типы и классификация плазмотронов атмосферного давления. Основные виды плазменных технологий (резка, плавка, сварка, напыление, плазмохимия, нанопорошки). Плазменно-ионные технологии и устройства (травление, очистка, нанесение покрытий, полировка). Приэлектродные явления и теплообмен в электродных пятнах, условия устойчивости горения электрических дуг. Математическое моделирование и расчет плазмы, плазмотронов и плазменных технологий (уравнение энергии и движения, электромагнитные задачи).

Электроэрозионные и анодно-механические методы обработки металлов. Электроэрозионная обработка металлов. Параметры импульсных разрядов. Основные операции, выполняемые электроэрозионным методом. Импульсные генераторы для

электроэрозионной обработки. Анодно-механическая обработка металлов. Основы анодно-механической обработки. Разновидности анодно-механической обработки.

Электрогидравлические и магнитно-импульсные методы обработки. Установки для электрогидравлической обработки. Физические процессы, происходящие при высоковольтном электрическом разряде в жидкости. Генераторы импульсов тока. Технологическое использование электрического разряда в жидкости. Магнитно-импульсная обработка металлов. Физические основы магнитно-импульсной обработки металлов. Элементы оборудования установок магнитно-импульсной обработки. Характеристики операции магнитно-импульсной обработки.

Промышленные лазеры. Физические основы лазерной техники. Принцип действия и характеристики газовых и твердотельных лазеров, лазерные технологии.

Ультразвуковые установки и методы сварки, очистки и интенсификации технологических процессов.

#### **4. Электротехнологические процессы в экологии**

Основные электрофизические и электротехнологические методы очистки окружающей среды. Очистка воздушной и водной среды посредством озона. Основные электрофизические методы получения озона. Электрофильтры. Плазмохимические методы нейтрализации и разложения токсичных газов. Электротехнологические методы переработки твердых бытовых отходов. Методы деструкции радиоактивных отходов.

#### **5. Системы электропитания электротехнологических установок**

Источники питания электротехнологических установок промышленной частоты. Источники питания дуговых и рудно-термических печей, выбор печных трансформаторов, методы регулирования мощности в печах. Системы управления режимом работы источника питания.

Источники питания постоянного тока для электротехнологических установок. Основные схемы выпрямления, регулирования тока и напряжения источников питания. Формирование падающих вольтамперных характеристик источников. Условия совместимости источников питания с первичной сетью.

Источники питания установок индукционного нагрева. Особенности построения схем инвертирования тока и выбор элементной базы для статических источников питания индукционных установок. Ламповые генераторы. Основные схемы генерации и регулирования мощности. Генераторные триоды, параметры ламповых генераторов.

Магнетронные источники питания сверхвысокой частоты для целей нагрева.

#### **6. Автоматическое управление электротехнологическими процессами**

Принципы и задачи автоматического управления электротехнологическими установками. Импульсные и непрерывные методы регулирования режимов электротехнологических установок. Программное управление. Понятие о самонастраивающихся системах управления.

Автоматическое управление электропечами сопротивления. Позиционные регуляторы температуры. Динамика систем непрерывного регулирования температуры. Расчет и настройка регуляторов температуры. Современные типовые регуляторы температуры.

Автоматическое управление индукционными электротехнологическими установками. Управление плавильными установками промышленной частоты. Принцип управления индукционными установками на средних частотах. Управление высокочастотными установками с ламповыми генераторами.

Автоматическое управление режимами дуговых сталеплавильных печей. Сталеплавильная печь как объект регулирования. Задачи управления. Промышленные регуляторы дуговых сталеплавильных печей. Системы комплексного управления дуговыми печами с применением ЭВМ. Автоматическое регулирование режима рудовосстановительных печей.

Автоматическое управление вакуумными дуговыми печами. Требования к автоматической системе ведения плавки. Автоматические регуляторы длины дуги и мощности.

Автоматическое управление установками электрошлакового переплава. Режимы работы установки электрошлакового переплава и выбор параметров регулирования.

Автоматическое управление плазменными, электронно-лучевыми и лазерными установками.

## **7. Особенности математического моделирования электротехнологических процессов**

Структура и физический смысл основных уравнений, описывающих электротехнологические и электрофизические процессы (уравнения стационарной и нестационарной теплопроводности, баланса энергии, движения и неразрывности). Уравнения электромагнитного поля (Максвелла, цепные задачи).

Плоские и цилиндрические задачи, граничные и начальные условия. Нелинейные задачи и итерационный метод их решения. Элементы вычислительной математики: методы конечных элементов, конечных разностей.

Применение методов теории подобия к моделированию электротехнологических процессов.

### Основная литература

1. Болотов А.В., Шепель Г.А. Электротермические установки. - Алма-Аты: Мектеп, 1983.
2. Электротехнологические промышленные установки. / И.П. Евтюкова и др. - М.: Энергоиздат, 1982.
3. Электротехнические 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.
4. Васильев А.С., Гуревич С.Г., Иоффе И.С. Источники питания электротермических установок. - М.: Энергоатомиздат, 1985.
5. Установки индукционного нагрева /Под ред. А.С. Слухоцкого. - Л.: Энергоиздат, 1981.
6. Автоматическое управление электротермическими установками. / А.М. Кручинин, Ю.М. Миронов, К.М. Махмудов, В.П. Рубцов, А.Д. Свенчанский. - М.: Энергоатомиздат, 1990.
7. Древин С. В. Генераторы низкотемпературной плазмы // Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Т. 2. / Под ред. В.Е. Фортова. - М.: Наука: ДАИК «Наука/Интерпериодика», 2000
8. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. - М.: Энергоатомиздат, 1984.

### Дополнительная литература

1. Чередниченко В.С., Бородачев А.С., Артемьев В.Д. Электрические печи сопротивления. Теплопередача и расчеты электропечей сопротивления: Т.1. – Новосибирск: Издательство НГТУ, 2006.
2. Электротехнический справочник. Т.4. Использование электрической энергии. / Под ред. В.Г. Герасимова и др. – М.: Издательство МЭИ, 2002.
3. А.М. Krouchinin, A. Sawicki. A Theory of electrical arc heating. The Publishing Office of TUCz. 2003.
4. А.М. Krouchinin, A. Sawicki. Modelling of the constricted arc in plasma generators. The Publishing Office of TUCz. 2005.
5. Мармер Э.Н. Материалы для высокотемпературных вакуумных установок. – М.: Физматлит, 2007.
6. Кайдалов А.А. Электронно-лучевая сварка и смежные технологии. Изд. 2-е, перераб. и дополн. – Киев: Электротехнология, 2004.
7. Сидоров О.Ю., Сарапулов Ф.Н., Сарапулов С.Ф. Методы конечных элементов и конечных разностей в электромеханике и электротехнологии. – М.: Энергоатомиздат, 2010.
8. Структурное моделирование электротехнологических систем и механизмов. / В.А. Иванушкин, Д.В. Исаков, В.Н. Кожеуров, Ф.Н. Сарапулов; под общ. ред. Ф.Н. Сарапулова; Нижнетагил. технол.ин-т (фил.) УГТУ-УПИ. Нижний Тагил: НТИ (ф) УГТУ-УПИ, 2006.
9. Минеев А.Р., Коробов А.И., Погребиский М.Я. Моделирование электротехнологических процессов и установок. – М.: Компания Спутник+, 2004.
10. Алиферов А., Луци С. Индукционный и электроконтактный нагрев металлов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011.

11. А.М. Кручинин. Основы проектирования электрических и тепловых режимов электронагрева в дуговых печах.//Учебное пособие. М.: Издательство МЭИ, 2012.

12. В.С. Черднчеснко, А.С. Аньшаков, М.Г. Кузьмин. Плазменные электротехнологические установки. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008.