

Казахский Агротехнический Университет им. С.Сейфуллина

Энергетический факультет

Лектор: к.т.н., доцент Бабко А.Н.

*Дисциплина: **Электротехнология***

Цель курса: Формирование системы знаний и научно – технических основ рационального использования электрической энергии, при обогреве и технологических процессах, для решения инженерных производственных задач



ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ

Курс «Электротехнология» является одной из основных дисциплин профессионального цикла. Относится к числу фундаментальных дисциплин, определяющих своим содержанием профессиональную подготовку специалистов. С учетом уровня развития науки, техники, современного состояния электротехнологии и ее теоретической базы данный курс объединяет и систематизирует наиболее важные принципы в данной области. Изучение данного курса позволит приобрести знания и навыки необходимые для успешной производственной деятельности.



Изучение дисциплины “Электротехнология” позволит приобрести навыки и компетенции необходимые для дальнейшей успешной профессиональной деятельности

Задачи курса:

Изучить физические основы преобразования электрической энергии в тепловую энергию

Освоить расчеты электротехнологических установок (ЭТУ)

Изучить принцип действия и устройство ЭТУ

Изучить принципы и схемы автоматизации ЭТУ. Уметь применять.

Уметь ставить и решать инженерные задачи в области электротехнологии

Научиться проектировать ЭТУ и производить ТЭО

Литература

■ Основная литература:

- 1. А.М. Басов и др. Электротехнология. Учебное пособие.- М.: Агропромиздат, 1985.
- 2. А.В. Суворин. Электротехнологические установки. Красноярск: СФУ (Лань), 2011.
- 2. В.А. Карасенко, Е.М. Заяц, А.Н. Баран. Корко В.С. Электротехнология.- М.: Колос, 1992.
- 3. Глушков А.М. Юдаев И.В. Электротехнология. – Волгоград: Волгоградская ГСХА, 2008.
- 4. Амерханов Р.А., Бессараб А.С., Драганов Б.Х. Теплоэнергетические установки и системы с.х.- М: Колос-Пресс, 2002.
- 5. Бабко А.Н. Электромеханика и электротехническое оборудование. Учебное пособие. - Астана: КАТУ, 2009.
- 6. Бабко А.Н. Электротехнология. УМК дисциплины -Астана: КАТУ, 2010.

Литература

- **Дополнительная литература:**
- 1. Кудрявцев И.Ф., Карасенко В.А. Электрический нагрев и электротехнология: Учебное пособие.- М.: Колос, 1975.
- 2. Утешев У. Электртермиялық, қондырғылардың теориялық және жобалау негіздері. - Алматы: Каз УАУ, 1996.
- 3. Гайдук В.Н., Шмигель Г.В. Практикум по электротехнологии.-М: Агропромиздат, 1989.
- 4. Болотов А.В., Шепель Г.В. Электротехнологические установки.- Алматы, 1992.
- 5. Утешев У. Электротермические установки в животноводстве. Учебное пособие.- Алма-Ата: Каз СХИ, 1988.
- 6. Печагин Е.А., Зарандия Ж.А. Электрооборудование электротермических установок.- Тамбов: Тамбовский ГТУ, 2008.
- 7. Серапулов Ф.Н. и др. Электротехнологическая виртуальная лаборатория. – Екатеринбург, 2003.

Сведения о дисциплине и задания (о/о)
для специальности 5В081200

Электротехнология в с/х - предмет цикла ПД/ОК, количество кредитов -3, семестр 6, всего часов – 135.

Предусмотрены следующие виды работы:

лекции; лабораторно-практические занятия, курсовая работа; самостоятельная работа (СРС), отчетность по всем видам работы; рубежные контроли; итоговый контроль - экзамен.

Курсовая работа выполняется по индивидуальному заданию, может быть по теме предлагаемой студентом (в рамках темы будущего ДП). **РК1 и РК2** предусматривают выполнение расчетных заданий

- (в каждом рубежном контроле 4-5 заданий).
- **СРС** выполняется согласно заданий указанных в ОЛ-6, с использованием выше приведенной литературы.
- Для специальности **5В071800** – Электроэнергетика, дисциплина называется «**Электротехнология**», предмет цикла БД/КВ, количество кредитов -3, семестр 6, всего часов – 135.

Предусматриваются все виды работ, за исключением курсовой работы

Задание на рубежный контроль 1 (о/о)

1. **Расчет элементных нагревателей** (гл.6. ОЛ 5 или гл.4.1 ОЛ 6). Изучить материал. Задание из приложений. Привести краткие сведения, расчет, схему соединения нагревателей, схему включения нагревателей в сеть.
2. **Расчет электродного нагревателя с регулированием мощности** (гл.4.2. пр.2 ОЛ 6 или любой электродный нагреватель из ОЛ 5) Изучить необходимый материал, привести краткие теоретические сведения, расчет, схему включения и схему управления.
3. **Расчет и выбор ТЭНов** (гл.4.3 из ОЛ6).Изучить требуемый материал, привести краткие сведения, расчет, привести эскиз ТЭНа, схему их размещения.
4. **Расчет тепловых режимов электронагревательных установок.** (ОЛ 5, из ОЛ 6 гл.4.4).
Изучить требуемый материал, привести общие положения теплового расчета, расчет, привести эскиз ЭНУ, схему их размещения.
5. **Расчет электрокалориферных установок.** (ОЛ 6, гл.4.5). Изучить необходимый материал, провести расчет, провести компоновку ТЭН, привести технические характеристики схему управления.
 - *(возможна замена: расчет электрообогреваемых полов, трубопроводов, кровли и др.)*

Задания на рубежный контроль 2 (о/о)

1. **Расчет установок диэлектрического нагрева.** (гл.4.8 ОЛ 6). Изучить необходимый материал (ОЛ 5,6 и др.), привести теоретические сведения, расчет, функциональную и принципиальную схему. Исходные данные можно принять самостоятельно, гл.4.8 ОЛ 6).
2. **Расчет и выбор трансформаторов для электроконтактного нагрева** (гл.4.9 ОЛ 6). Изучить необходимую литературу, привести теоретические сведения, произвести расчет, привести схемы.
3. **Расчет индукционных установок** (гл.4.11, 4.12 ОЛ 6, на выбор). Мощность установки принять по своему варианту. Изучить материал, провести расчет, разработать схему включения и управления.
4. **Расчет систем микроклимата** (ОЛ 6, гл.4.10). Изучить литературу по данному вопросу. Для расчета, предлагается использовать данные объекта по ДП или КР. После расчета мощности необходимо выбрать оборудование и разработать схему питания и управления. Предусмотреть энергосберегающие системы и установки.
5. **Электротехнология** : УЗ обработка материалов; электролизные установки; электроимпульсные устройства; электронно-ионные технологии; электронно-лучевой нагрев; ионный нагрев; лазерный нагрев; термоэлектрический нагрев. (на выбор студентов, одна из тем. Привести функциональные схемы, пояснить принцип работы, привести порядок расчета, по возможности расчет.

Сведения о дисциплине и задание на к.р. (з/о, д/о)

Электротехнология - предмет цикла профессиональных дисциплин, количество кредитов -3, всего часов – 135.

Предусмотрены следующие виды работы:

лекции; лабораторно-практические занятия, контрольная работа; самостоятельная работа, отчетность по всем видам работы; итоговый контроль - экзамен.

В **контрольной работе** предусматривается выполнение **заданий**. исходные данные и номер варианта приведены в ОЛ [5,6].

1. Расчет и выбор сечения проводов и кабелей по условиям нагрева.

Для выполнения задания необходимо изучить материал гл.1 и 2 ОЛ [5] или материал по данной теме из других источников. Исходные данные гл.2.5 ОЛ [5]. В схеме произвести замену согласно своему варианту. Например, вариант 3, производим замену 3 и 6 номеров нагрузки (3+3), если более 9-10 вычитаем. При двухзначном номере, согласно цифрам. Вместо заменяемых двигателей установить электронагреватель любого типа и щит освещения (согласно варианту, №15, ЩО 1,5 кВт и т.д.). Все двигатели Заменить на серию 4А близкую по мощности табл.2.2, привести маркировку.

Задание на контрольную работу (з/о, д/о)

- 2. Расчет электронагревательной установки** (гл.6. ОЛ 5 или гл.4.1 ОЛ 6) Изучить материал ОЛ 5,6. Задание из приложений. Привести краткие теоретические сведения, расчет, схему соединения нагревателей, схему включения нагревателей в сеть.
- 3. Расчет электродного нагревателя с регулированием мощности** (гл.4.2. пр.2 ОЛ 6 или любой электродный из ОЛ 5) Изучить необходимый материал (ОЛ5,6), привести краткие теоретические сведения, расчет, схему включения и схему управления.
- 4. Расчет установок диэлектрического нагрева.** (гл.4.8 ОЛ 6). Изучить необходимый материал (ОЛ 5,6 и др.), привести теоретические сведения, расчет, функциональную и принципиальную схему. Исходные данные принять самостоятельно, гл.4.8 ОЛ 6).
- 5. Расчет установок индукционного нагрева.** (гл.4.11, 4.12 ОЛ 6, на выбор). Мощность установки принять по своему варианту, задания 2 или 3. Изучить материал, расчет, схема включения и управления.
- 6. Расчет и выбор трансформаторов для электроконтактного нагрева** (гл.4.9 ОЛ 6). Изучить необходимую литературу, привести теоретические сведения, произвести расчет, привести схемы.

1. Основные положения электротехнологии

Тема 1: Основные положения и понятия электротехнологии.

Все основные стационарные процессы в промышленности и в с. х. производстве выполняются с помощью электрической энергии. Она сравнительно легко передается на большие расстояния и представляет собой наиболее доступный, надежный и универсальный энергетический источник, позволяющий получать энергию других видов.

- В зависимости от вида применяемой энергии, характера протекающих процессов, и действующих сил различают электротехнологию, биотехнологию, химическую и др.
- **Электротехнология** – область науки и техники, изучающая приемы, способы и средства выполнения производственных процессов, использующих электрическую энергию непосредственно или с предварительным преобразованием в другие виды.
- Технологические процессы, связанные с преобразованием электрической энергии в тепловую и ее использованием, объединяют термином **«электротермия»**.

1. 1 Основные положения электротехнологии

Под **электротехнологией** понимают применение электрической энергии, в технологических процессах любого производства, **виде электрических и электромагнитных полей, электрических разрядов и импульсов** непосредственно на обрабатываемые материалы, живые организмы и растения. **Электротехнология** позволяет исключить промежуточные преобразования электрической энергии в другие виды, что повышает эффективность ее применения в различных технологических процессах.

В **электротехнологии** принято различать следующие направления:

- технология обработки электрическим током;
- электронно-ионная технология;
- электроимпульсная технология.
- К **первому типу** относятся процессы в которых преобладают явления электроосмоса и электрофореза, использование электрического тока в химической промышленности и металлургии, для стимуляции роста растений и т.д.
- **Второе направление** имеет большее распространение и используется как в промышленности, так и в с.х. производстве (например, при сортировке мелких материалов и зерновой продукции). Поле коронного разряда используется: для электризации различных аэрозолей, при этом, оседание частиц аэрозолей увеличивается на 20-40%; для аэроионизации воздуха (10 в 14,15 степени), восстанавливает защитные свойства живого организма; Для электрофлокирования.
- **Примером электроимпульсных методов** может служить электрогидравлический эффект (разрушение твердых материалов), электроискровая обработка материалов, электроимпульсные заградительные устройства и др.

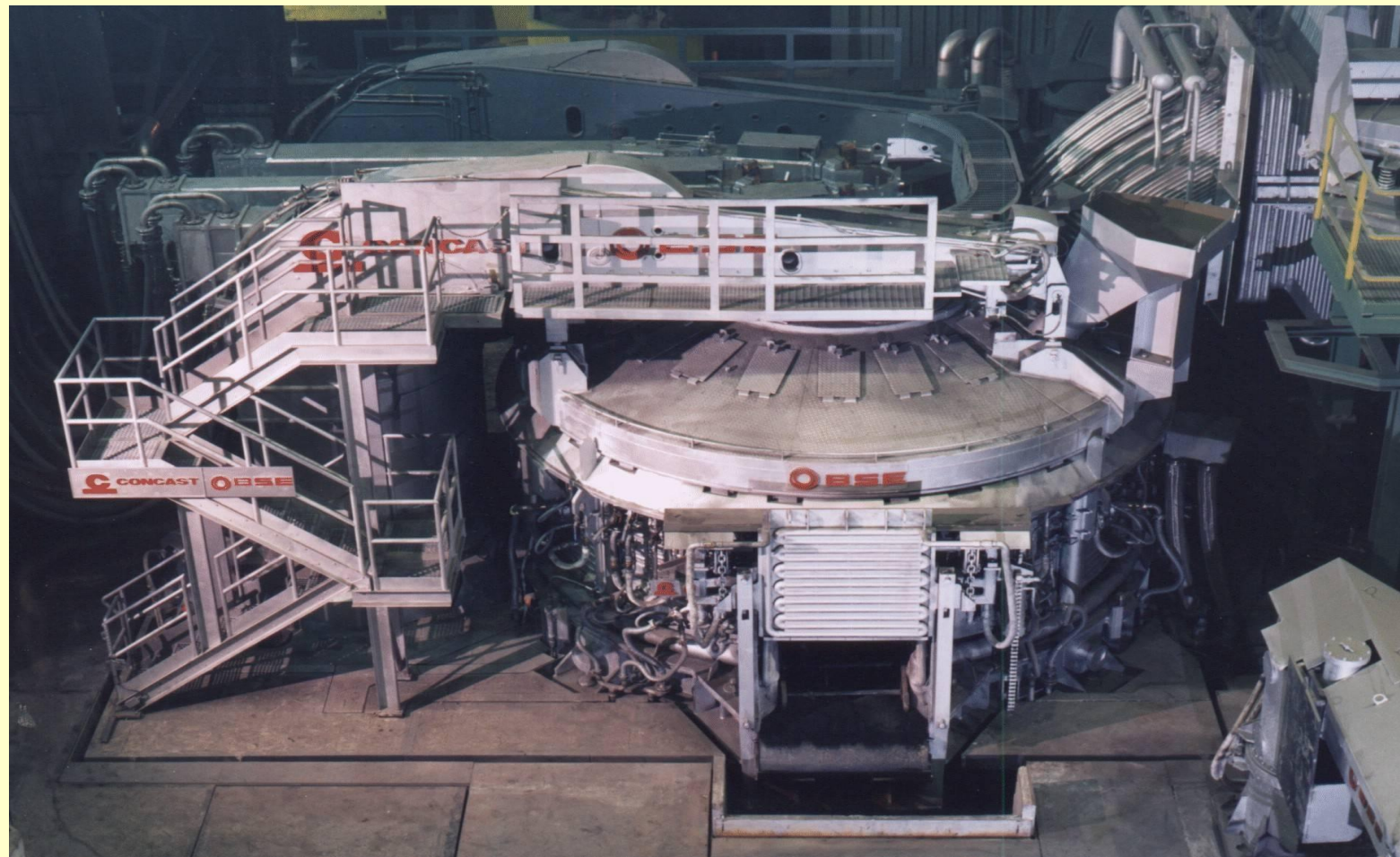
Преимущества выплавки стали в дуговых печах (пример направления 1) к П.1.1

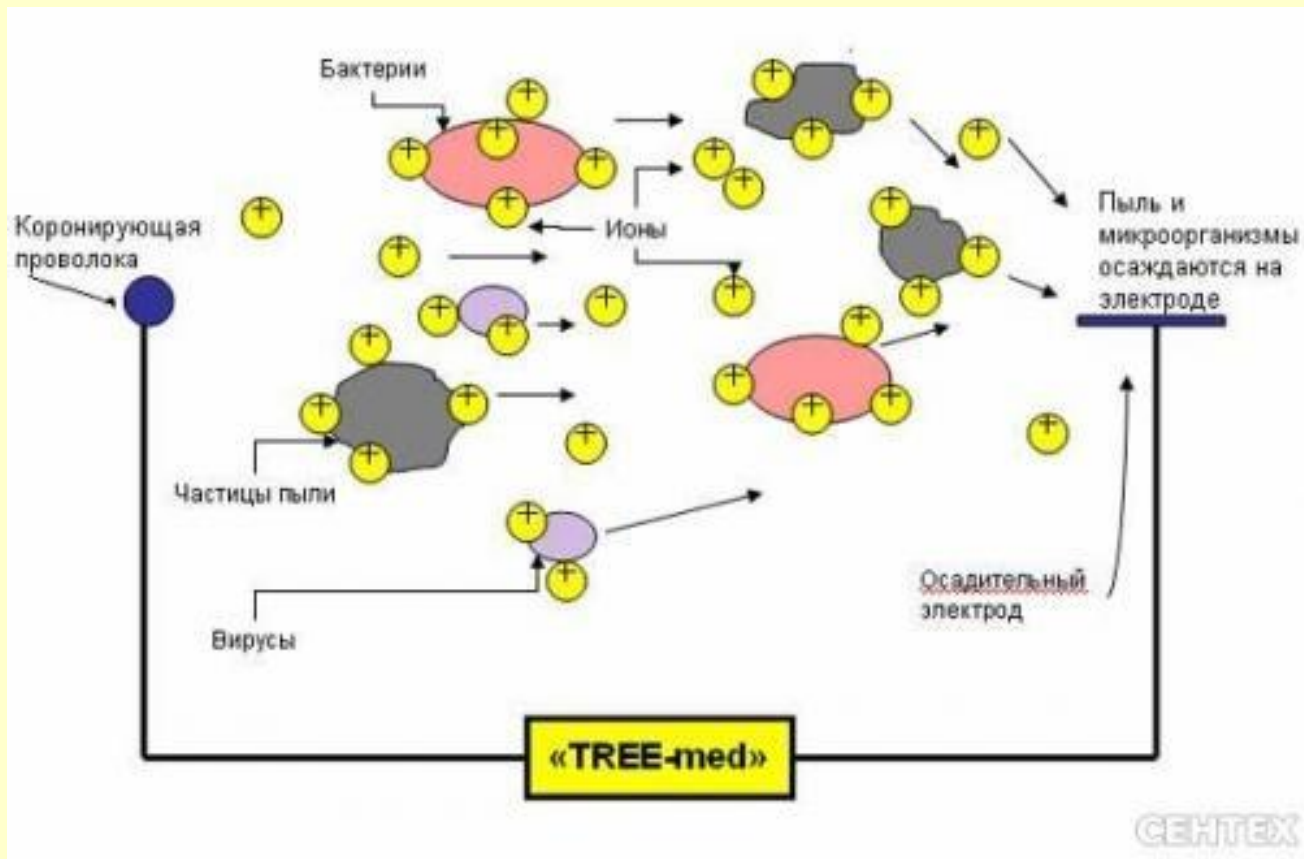
- требует меньших капиталовложений
- отличается более низкими показателями удельной энергоемкости (2,3 против 5,5 Гкал/т),
- отличается гибкостью в использовании различных видов металлошихты,
- характеризуется меньшими издержками производства, расходом сырьевых материалов, выбросами в окружающую среду,
- быстрее реагирует на изменение потребностей по сортаменту и качеству проката, определяемых рынком потребителей.

В результате 20-летнего совершенствования технологии плавки стали в **дуговых печах**, продолжительность плавки сократилась с 180 до 40 мин, уменьшился расход электроэнергии с 630 до 290 кВтч/т и металлографитовых электродов - с 6,5 до 1,2 кг/т

Конструкция ДСП

(пример направления 1) к П.1.1





Принцип работы
ионизатора воздуха
(пример направления 2) к
п.1.1

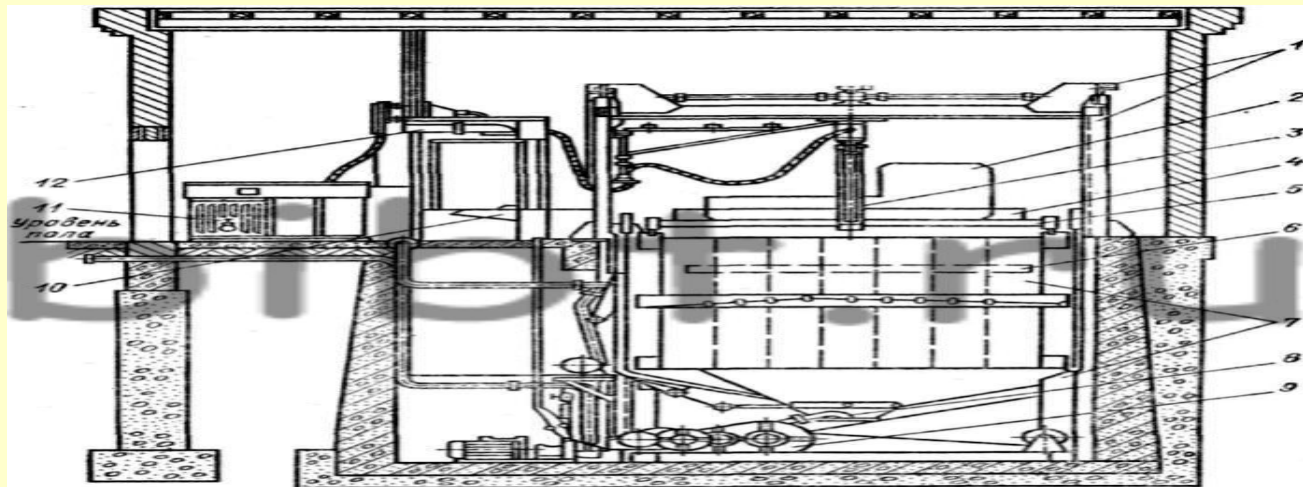


На ионизирующие электроды подается ток высокого напряжения. Под его влиянием на электродах образуется разряд, и с них начинают «стекать» электроны. При взаимодействии электронов с атомами и молекулами кислорода в непосредственной близости от электрода образуются легкие отрицательные ионы кислорода, которые расширяющимся конусом движутся от иголок ионизатора на расстояние 3-4 метра. При «стекании» с электродов ионизатора электроны «прилипают» к молекулам кислорода, образуя поток заряженных частиц, который иногда называют аэроионным ветром. Поскольку электроны и отрицательные ионы сталкиваются и захватывают с собой нейтральные молекулы и положительные ионы, сила потока не всегда говорит об уровне ионизации. Иногда при сильном потоке уровень ионизации может быть невелик и наоборот. Точно определить уровень ионизации можно только специальным прибором - ионометром.

Ионизатор воздуха

(пример направления 2, к п.1.1)

- **Пример направления 3, к П.1.1** *Электрогидравлические установки* могут быть использованы как для крупнокускового, так и для очень тонкого дробления, вплоть до коллоидного. *Электрогидравлические установки* применяются и для нанесения лака. Работа на этих установках требует строгого соблюдения правил техники безопасности. *Электрогидравлические установки* используют для выбивки стержней из стальных, чугуновых отливок, отливок из цветных сплавов. Эти установки могут быть использованы в единичном, мелкосерийном и серийном производстве. Наиболее целесообразно их применение для выбивки стержней из крупных и средних отливок.



1.2 Особенности с.х.предприятий

- Сельскохозяйственные предприятия, как объекты теплоснабжения имеют характерные особенности, к которым **в первую очередь относятся:**
- - низкая плотность тепловых нагрузок и большое удаление потребителей, что обуславливает широкое распространение децентрализованных систем теплоснабжения от топливных котельных, обладающих целым рядом известных недостатков;
- - большая неравномерность нагрузки и малый коэффициент использования максимума, что сопровождается перерасходом топлива в периоды провалов нагрузки;
- - для нормальной жизнедеятельности животных, птиц, и растений необходимы оптимальные параметры микроклимата, не допускающие резких колебаний.
- В сельскохозяйственном производстве большинства развитых стран электроэнергия широко используется в качестве источника тепла.
- например, в 70- 80-х годах на тепловые нужды производства и быта приходилось в Австрии – 40%, в Германии -55%, в США – в пределах 50% от общего потребления электроэнергии сельским хозяйством. Причем, удельный вес электроэнергии, используемой на электрическое и тепловое снабжение, продолжает расти быстрыми темпами и составляет в настоящее время существенную часть энергетического баланса.
- Потребность в энергоресурсах удваивается через каждые **10...15 лет**. Рост производства сельхозпродукции сопровождается возрастанием энергоемкости технологий её производства. Так, прирост сельскохозяйственной продукции на **1%** требует увеличения расхода энергоресурсов на **2...3 %**.
- Такой рост энергетических затрат характерен для большинства промышленно развитых стран. Например, в США (в конце 90 годов и начале 2000 г.) удвоение урожаев сопровождалось 10-кратным увеличением расхода энергии.

1.3 Особенности с.х.предприятий

- По данным ВИЭСХ в общем балансе энергии, затрачиваемой на получение сельскохозяйственной продукции в расчёте на одного человека, доля тепловой энергии доходит до **90%**. Из общей потребности сельского хозяйства в различных видах энергии на долю тепловой приходится порядка **65 %**.
- Широкое применение электроэнергии для электрификации тепловых процессов сдерживается недостаточной мощностью электрических станций и пропускной способностью сельских сетей, ограниченной номенклатурой и объёмом выпускаемого электротермического оборудования, а также не всегда грамотным решением вопросов применения электрического нагрева, что не позволяет получить от электронагрева максимальный экономический эффект.
- До недавнего времени считалось, что электронагрев сопровождается перерасходом энергетических ресурсов из-за потерь при двукратном преобразовании энергии топлива (сначала в электрическую на электростанции, а затем в тепловую в электротермической установке). Однако в результате всесторонних исследований установлено, что при электронагреве первичные энергоресурсы, наоборот, экономятся.
- При этом, необходимо учитывать социальные и экологические аспекты применения электротехнологических процессов и операций в различных секторах экономики, особенно в агропромышленном секторе.

1.4 Особенности с.х. предприятий

длительный опыт использования ЭТУ в с.х. производстве показывает их положительный эффект :

- - повышение продуктивности животноводства и птицеводства, снижение падежа животных (птицы) и удельного расхода кормов.
- Отечественный и зарубежный опыт эксплуатации электроотопительных установок показывает, что использование электрической энергии позволяет с большой точностью поддерживать необходимые условия микроклимата в помещениях, на **15...20%** увеличить суточные приросты при откорме скота, снизить на **20...25%** расход кормов, снизить на **10...15 %** - падеж молодняка и увеличить на **30 %** яйценоскость кур;
- - в быту сельских жителей (приближение образа жизни к городскому), уменьшения трудозатрат в зависимости от особенностей традиционных систем теплоснабжения;
- - благотворное влияние микроклимата на строительные конструкции животноводческих помещений, на технологическое, электросиловое и осветительное оборудование;
- - высвобождение работников, обслуживающих мелкие котельные и огневые установки;
- - выравнивание суточных и сезонных графиков электрической нагрузки. Использование тепловых нагрузок в качестве потребителей-регуляторов электрических графиков является чрезвычайно эффективным;
- - уменьшение стоимости передачи электрической энергии от районных подстанций к потребителю, с увеличением электропотребления в хозяйствах при электротеплоснабжении;
- - значительное снижение трудоемкости при обслуживании систем электротеплоснабжения по сравнению с обслуживанием индивидуальных и групповых систем;
- - высокая фондоотдача, так как именно этот показатель для электроотопительного оборудования в сельском хозяйстве **в 2...3 раза выше**, чем любого другого оборудования.

1.5 Способы нагрева

В электротермии в зависимости от способа преобразования электрической энергии в тепловую различают: нагрев сопротивлением, дуговой нагрев, индукционный нагрев, диэлектрический нагрев, электронный нагрев, нагрев излучением оптического квантового генератора (лазера), плазменный нагрев, термоэлектрический нагрев. Применение электрической энергии для генерации теплоты **обеспечивает**: возможность концентрации большой энергии в малых объемах, вследствие чего могут быть получены высокие температуры, недостижимые при других способах теплогенерации; возможность иметь большие скорости нагрева и компактность конструкции электротермических установок; возможность регулирования значения температуры и зоны её распределения в рабочем пространстве электротермической установки, что позволяет осуществлять равномерный нагрев в больших объемах материалов и изделий (при прямом электронагреве) или избирательный нагрев (при поверхностной закалке, при зонной плавке), создавая при этом благоприятные условия для автоматизации теплового и технологических процессов

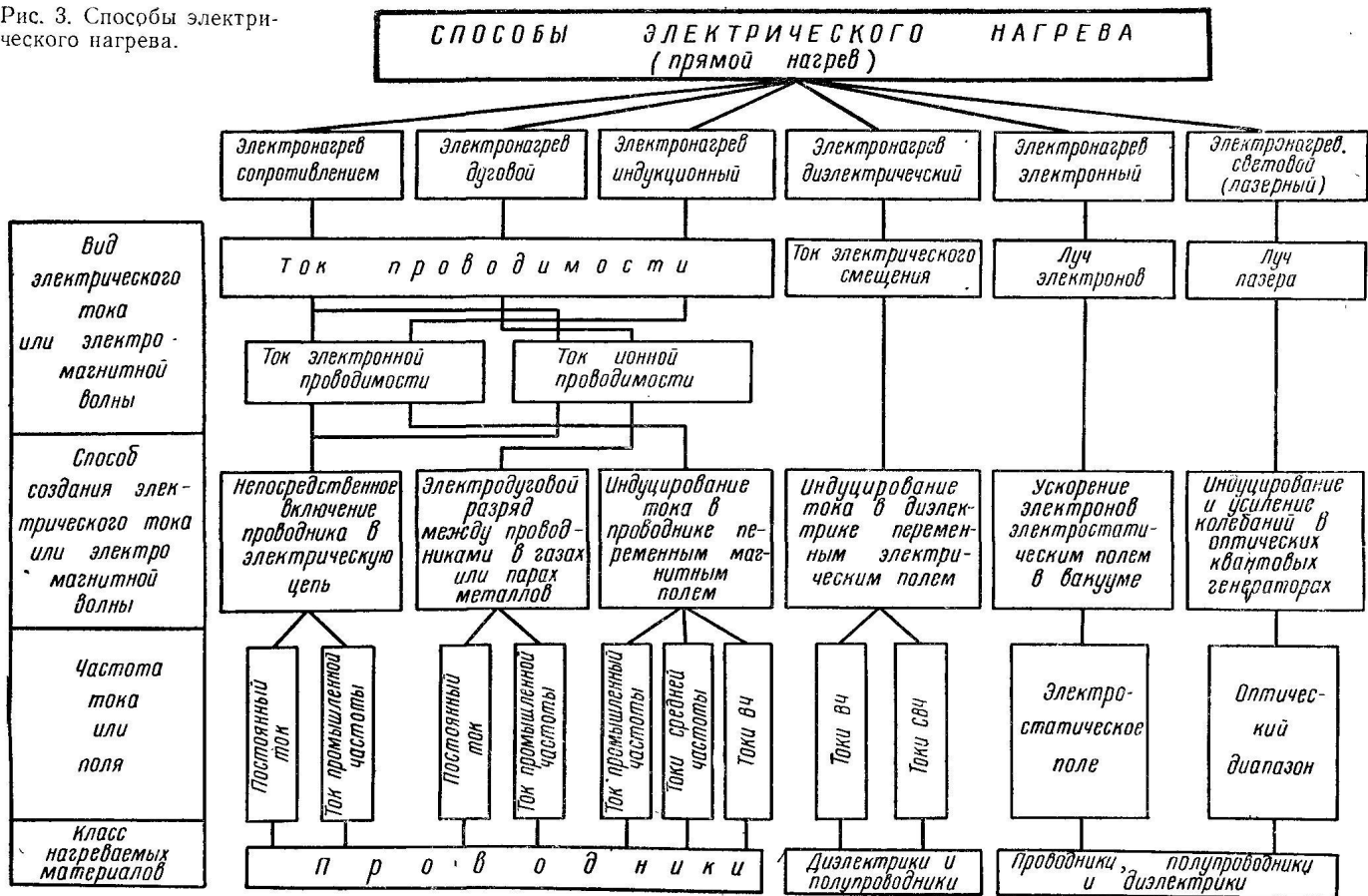
1.6 Способы нагрева

Под термином **электрический**, подразумевается прямой электронагрев, при котором, энергия электромагнитного поля преобразуется в тепловую в нагреваемом материале. Прямой электронагрев применим к токопроводящим средам и материалам. **Косвенный электронагрев**, отличается от выше указанного тем, что электрическая энергия преобразуется в тепловую в специальных нагревательных устройствах, а от них тепло за счет **теплопроводности, конвекции, излучения** или их комбинации, передается нагреваемой среде. В связи с этим, электрическим можно назвать только прямой нагрев. При косвенном нагреве отсутствует воздействие электричества непосредственно на нагреваемый материал и используется лишь электрический способ получения тепла. **Способы преобразования** электрической энергии в тепловую различают по **основным признакам**: *виду греющего электрического тока или электромагнитной волны; способу создания электрического тока или электромагнитной волны; частоте тока или поля.*

1.7 способы нагрева

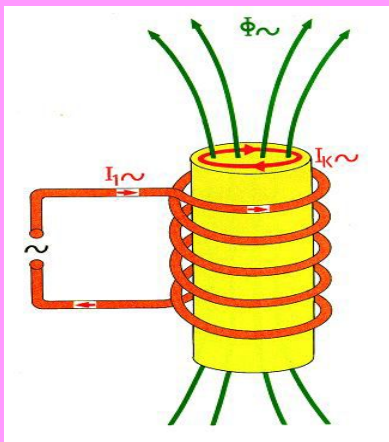
2*

Рис. 3. Способы электрического нагрева.



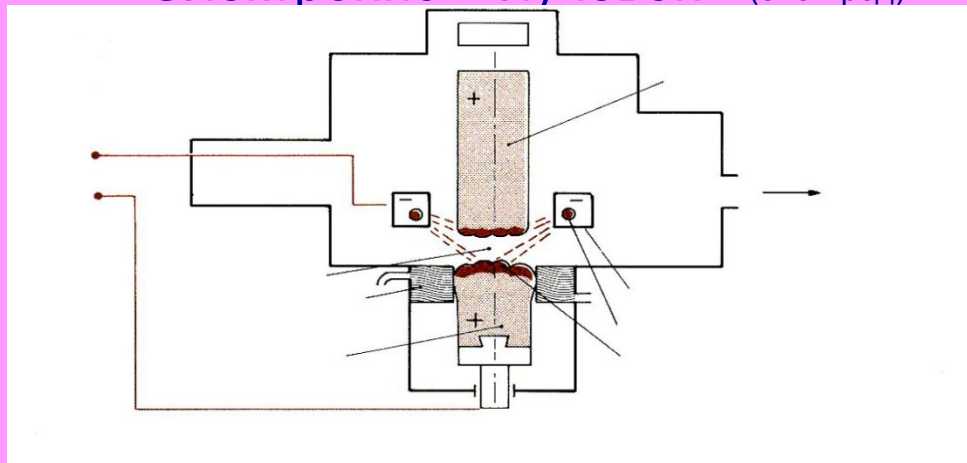
1.8 Способы нагрева

Индукционный



(питание)

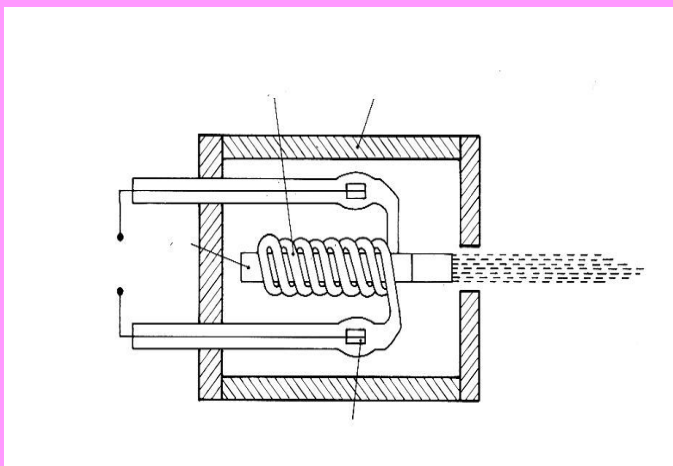
Электронно – лучевой (электрод)



вакуумный
насос
катод
платиновой
катушкой

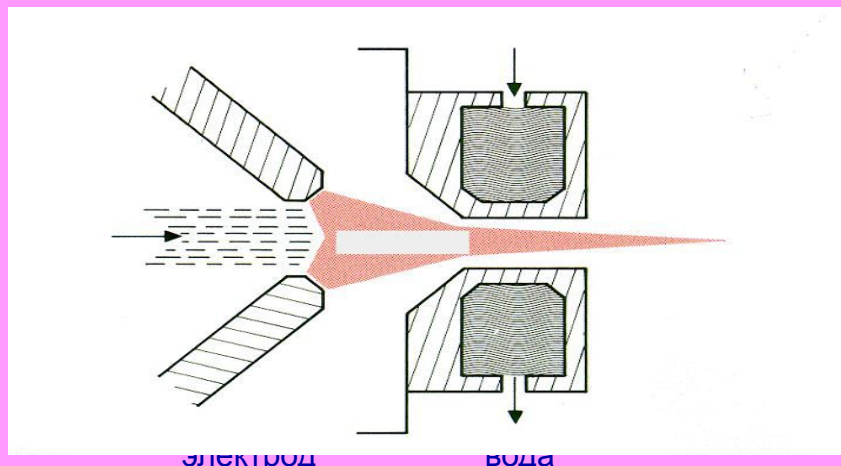
Лазерный

рубин ИС отражатель



Плазменный

газ электрод вода



плазменная
струя

1.9 Индукционная плавильная печь



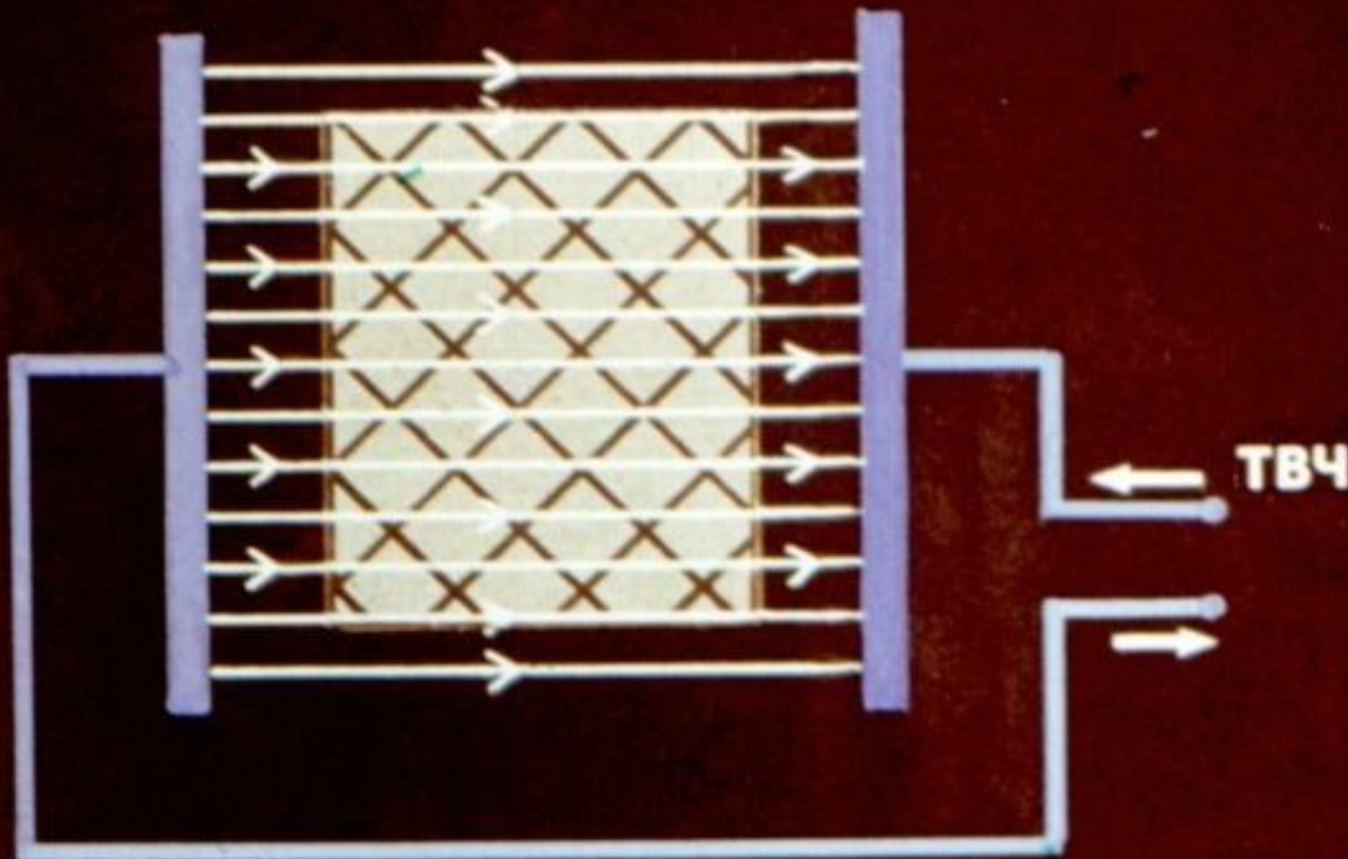
1.10 Индукционный нагрев ВЧ токами

ВЧ



1.11 диэлектрический нагрев ТВЧ

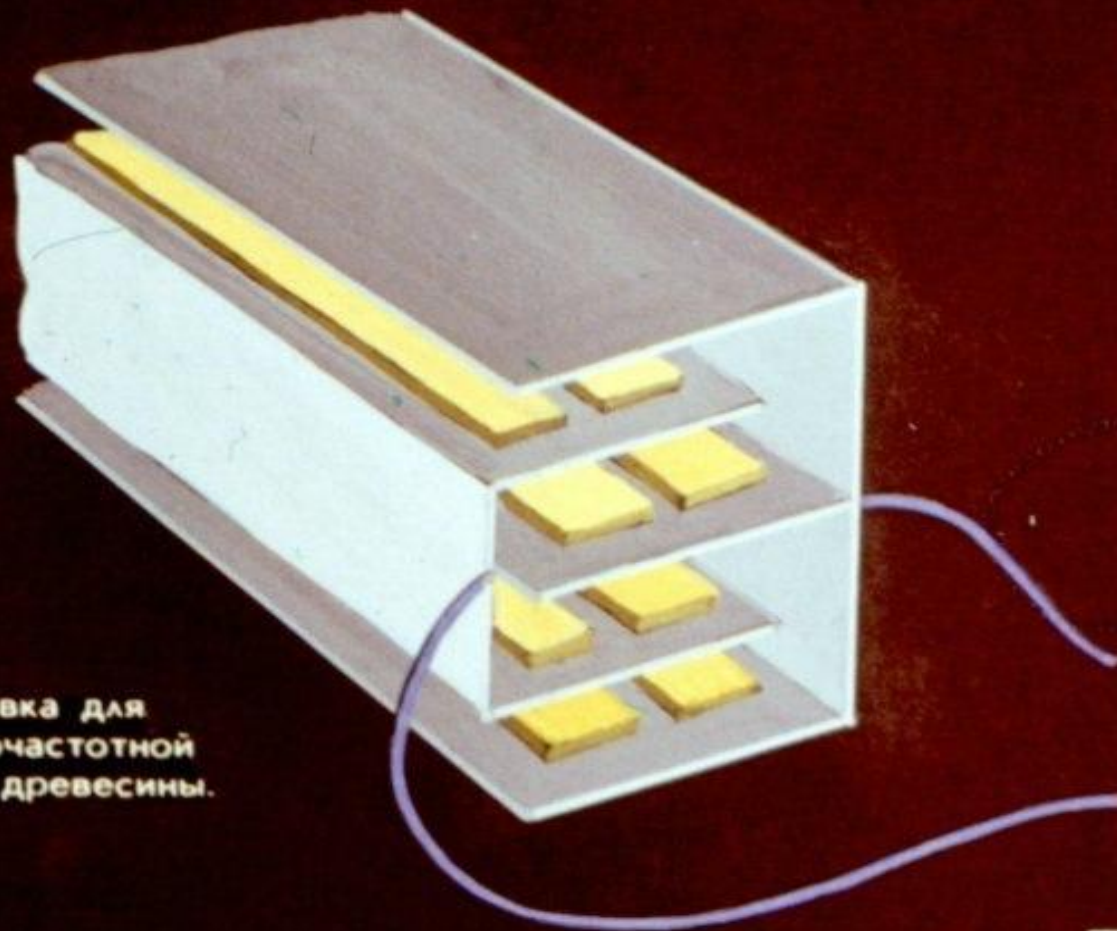
ТВЧ



На диэлектрики действуют высокочастотным электрическим полем, помещая их между пластинами конденсатора.

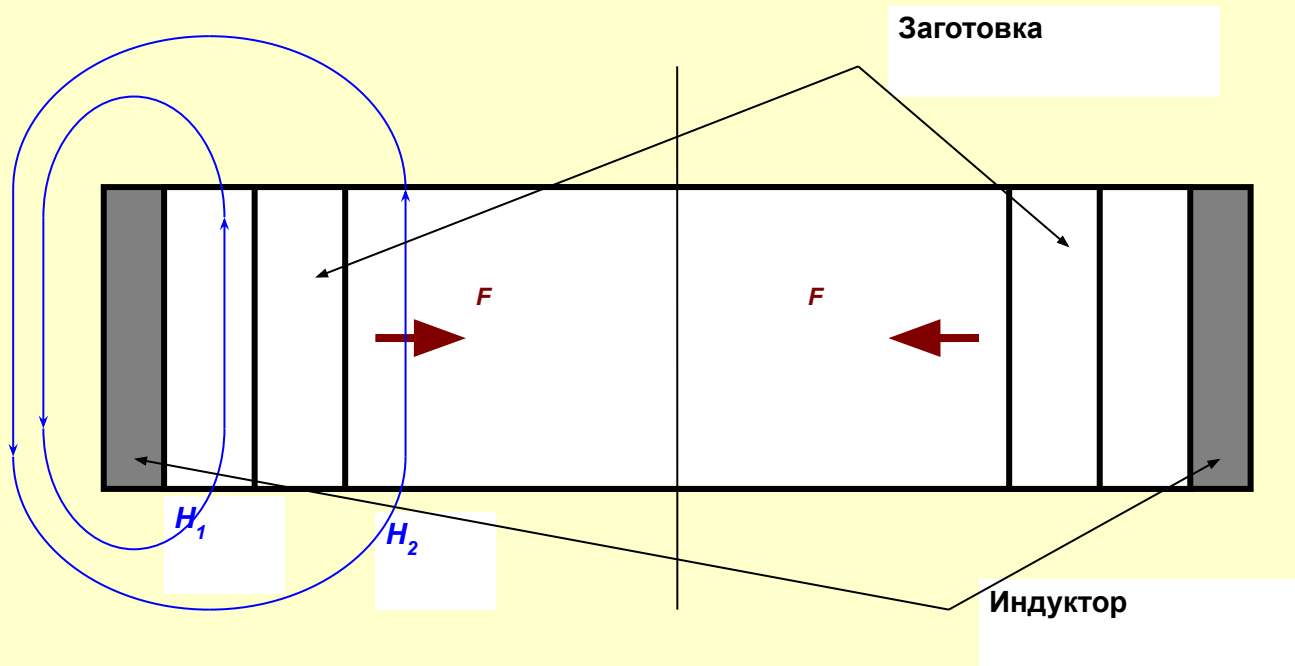
1.12 Сушка древесины ТВЧ

- ТВЧ



Установка для
высокочастотной
сушки древесины.

1.13 Магнитоимпульсная обработка материалов (МИОМ)



Давление магнитного поля на заготовку:

$$p = \mu\mu_0 \frac{H_1^2 - H_2^2}{2} \quad (9)$$

1.14 Электронагревательные приборы (нагрев сопротивлением, косвенный нагрев)



2. Энергетические основы электротехнологии

- Электромагнитное поле – форма существования материи, характеризующаяся совокупностью взаимосвязанных и взаимно обуславливающих электрического и магнитных полей. Распространение электромагнитного поля сопровождается электромагнитной энергией, представляющей собой сумму энергий электрического и магнитного полей. Изменениям электрического и магнитного полей сопутствует превращение электрической энергии в магнитную и магнитной в электрическую.
- Электромагнитное поле может существовать (проявляться) в различных формах: электрического поля, магнитного поля, электромагнитных волн, электрического тока и других электрических и магнитных явлений. Каждая из этих форм поля несет соответствующую ей энергию: электростатическую, магнитную, электромагнитную, электродинамическую и др. Наибольшее применение получила электродинамическая, или электрическая, энергия - энергия электрического тока.
- Каждый из видов энергии электромагнитного поля имеет определенные технологические свойства – способность поглощаться в вещественных средах и превращаться в тепловую, механическую, химическую или биологическую энергию и др.

2.1 система уравнений Максвелла

- Всё разнообразие форм и проявлений электричества подчиняется общим **законам электромагнитного поля**, описываемым системой уравнений **Максвелла**. Полная система уравнений Максвелла представляет собой **математическую модель поля**, из которой однозначно вытекают все его свойства, энергетические характеристики и возможные превращения.
- Для переменного электромагнитного поля в неподвижной однородной и изотропной среде:

$$\operatorname{rot} \bar{H} = \bar{J};$$

$$\operatorname{rot} \bar{E} = -\partial \bar{B} / \partial \tau$$

$$\bar{J} = \gamma \bar{E} + \partial \bar{D} / \partial \tau;$$

$$\bar{D} = \varepsilon_a \cdot \bar{E};$$

$$\bar{B} = \mu_a \cdot \bar{H};$$

$$\operatorname{div} \bar{D} = \rho;$$

$$\operatorname{div} \bar{B} = 0$$

2.2 Обозначения уравнений Максвелла

К системе уравнений:

где \vec{H} - напряженность магнитного поля, А/м;

\vec{J} - плотность полного тока, А/м²;

\vec{E} - напряженность электрического поля, В/м;

\vec{B} - магнитная индукция. Тл;

τ - время, с;

γ - удельная электрическая проводимость, См/м;

\vec{D} - электрическая индукция, Кл/м²

ρ - объемная плотность свободных электрических зарядов, Кл/м³;

\vec{v} - скорость движения свободных зарядов, м/с;

ϵ_a - абсолютная диэлектрическая проницаемость вещества, Ф/м;

μ_a - абсолютная магнитная проницаемость вещества, Гн/м.

2.3 Проявления ЭМП (анализ уравнений)

ЭМП.

Основное проявление электромагнитного поля в вещественных средах – **электрический ток**. Плотность полного тока **включает**:
плотность тока проводимости.

$\bar{J}_{\text{пр}} = \gamma \cdot \bar{E}$, пропорционального напряженности \bar{E} электрического поля;

плотность тока электрического смещения

$$\bar{J}_{\text{см}} = \partial \bar{D} / \partial \tau = \epsilon_a \cdot \frac{\partial \bar{E}}{\partial \tau},$$

пропорционального скорости изменения напряженности \bar{E} ;

плотность тока переноса зарядов в разреженном газе:

$$\bar{J}_{\text{пер}} = \rho \cdot \bar{v},$$

пропорционального скорости \bar{v} движения зарядов.

Уравнения, записанные для мгновенных значений векторов, - основные уравнения электромагнитного поля.

2.4 Анализ уравнений

ЭМП

Для изотропных сред при синусоидально изменяющихся во времени векторах \bar{H} и \bar{E} первое (без учета $\bar{J}_{\text{пер}}$) и второе уравнения Максвелла можно представить в комплексной форме:

$$\text{rot } \bar{H} = \gamma \cdot \bar{E} + j \cdot \omega \cdot \epsilon_a \cdot \bar{E}$$

$$\text{rot } \bar{E} = -j \cdot \omega \cdot \mu_a \bar{H}$$

Уравнение представляет собой обобщенный закон полного тока в дифференциальной форме, устанавливающий одну из важнейших связей между электрическими и магнитными явлениями: протекание в среде тока (проводимости, смещения или переноса) вызывает в ней магнитное поле ($\text{rot } \bar{E}$). Уравнение Фарадея – Максвелла описывает закон электромагнитной индукции: изменение магнитного поля во времени ($\partial B / \partial \tau$) возбуждает в среде электрическое поле ($\text{rot } \bar{E}$). Уравнение представляет собой закон Ома в дифференциальной форме

2.5 Вектор Пойнтинга

Основными параметрами электромагнитного поля служат векторы напряженности электрического и магнитного полей. Электрическое и магнитное поля – две взаимно связанные и взаимно обуславливающие составляющие единого электромагнитного поля. Каждое из них характеризуется своей энергией, значение которой зависит не только от параметров поля, но и от электрофизических свойств среды.

Движение энергии в электромагнитном поле характеризуется вектором Пойнтинга

$$\bar{P} = [\bar{E} \cdot \bar{H}],$$

представляющим собой поток энергии, $\text{В} \cdot \text{А} / \text{м}^2$, переносимой электромагнитными волнами за единицу времени через единичную поверхность, перпендикулярную направлению движения энергии.

Направление вектора перпендикулярно векторам \bar{E} и \bar{H} и совпадает с направлением движения энергии (распространения электромагнитных волн).

Энергия, поступающая в единицу времени в некоторый объем V , ограниченный поверхностью A ,

$$\bar{S} = -\oint_A \bar{P} \cdot d\bar{A} = -\oint_A [\bar{E} \cdot \bar{H}] \cdot d\bar{A},$$

Знак минус перед интегралом означает, что поток энергии направлен внутрь тела навстречу нормали к элементарной поверхности тела dA . В целом поток энергии – величина положительная. Так, как скалярное произведение $[\bar{P} \cdot dA] < 0$.

2.6 Превращение ЭМП в другие виды

ЭМП

Превращение энергии электромагнитного поля (ЭМП) в другие виды происходит при поглощении электромагнитных волн средами. Интенсивность поглощения и направленность превращений зависит от электрофизических свойств и частоты поля.

Электромагнитная волна, распространяясь в поглощающей среде, ослабляется в направлении распространения. Поток энергии, определяемой вектором Пойнтинга, является функцией расстояния z от поверхности среды и убывает по экспоненциальному закону

$$S_z = S_e \exp(-2kz),$$

где S_e - поток энергии на поверхности среды, В·А/м²; k – коэффициент затухания волны, м⁻¹.

Интенсивность затухания волны и, следовательно, поглощение энергии, определяются коэффициентом затухания k , представляющим собой функцию электрофизических свойств среды и частоты поля. Для поглощающих сред коэффициент k определяется формулой:

$$k = \omega \sqrt{\frac{\varepsilon_a \cdot \mu_a}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\gamma}{\omega \cdot \varepsilon_a}\right)^2} - 1 \right]},$$

где $\omega = 2\pi \cdot f$ - угловая скорость поля, рад/с.

Коэффициент затухания для металлов:

$$k = \sqrt{\omega \cdot \mu_a \gamma / 2}$$

2.7 Проявление ЭМП

ЭМП в технологических процессах.

- Магнитные поля используют и непосредственно в технологических процессах для изменения структуры и свойств неживой и живой материи, воздействуя на неё на молекулярном уровне.
- **Термическое действие** тока проявляется в нагреве сред, в которых он протекает.
- **Механические силы** поля в отличие от электродвижущих сил, действующих на элементарные заряды внутри тел, механически воздействуют на заряженные макротела, проводники с током, электро- и магнитострикционные тела, производя механическую работу по перемещению тел или изменению их объема и плотности.
- **Химическое действие** тока состоит в том, что его протекание в проводниках II рода (электролитах) сопровождается электролизом – окислительно-восстановительными реакциями на электродах, в результате которых получают новые вещества с новыми химическими свойствами.
- **Биологическое действие** заключается в том, что ток (поле) влияет на протекание жизненных процессов в биологических объектах. Это влияние может быть как стимулирующим, так и угнетающим.
- Превращение энергии электромагнитного поля в другие формы или виды происходит в строгих количественных соотношениях, определяемых законами термодинамики. Поступающая в приемник (систему тел) электроэнергия не «потребляется» и не «расходуется», а в соответствии с законом сохранения и превращения энергии **переходит из одного вида в другой (первый закон термодинамики)**, причем эти превращения протекают в определенном направлении – **в направлении возрастания энтропии системы (второй закон термодинамики)**.

3.1 Общие закономерности преобразования эл. энергии в другие виды

- Преобразование электрической энергии в тепловую энергию сопровождается затратой работы (энергии) электромагнитного поля.
- Существуют два термодинамически обратных пути или две схемы преобразования электрической энергии в тепловую энергию:
- **схема прямого преобразования** - когда энергия различных форм электричества поглощается телами и превращается в них в теплоту. Количество выделяющейся теплоты эквивалентно (с учетом потерь) работе внешних ЭДС, затраченной на производство поглощенной энергии;
- **схема косвенного преобразования**, когда электрическая энергия в тепловую не превращается, а используется лишь для переноса теплоты от одной среды к другой, причем температура источника теплоты может быть ниже температуры приемника. Количество перенесенной теплоты может в несколько раз превышать затраченную на это электрическую энергию.
- Энергия может передаваться непосредственно электромагнитными волнами оптического диапазона (инфракрасные лучи, лучи лазера), частота которых лежит в диапазоне собственных частот тепловых колебаний атомов и молекул вещества. Атомы и молекулы служат здесь приемниками электромагнитной энергии. Такой способ применим для нагрева любых материалов. Приёмниками электромагнитной энергии более низких частот являются входящие в состав веществ свободные или связанные элементарные электрические заряды (электроны, ионы), которые под действием электрического поля приобретают упорядоченное движение, образуя электрические токи

3.2 Общие закономерности преобразования эл. энергии в другие виды

- Приёмниками электромагнитной энергии более низких частот являются входящие в состав веществ свободные или связанные элементарные электрические заряды (электроны, ионы), которые под действием электрического поля приобретают упорядоченное движение, образуя электрические токи. В проводниках – ток проводимости, в диэлектриках – токи поляризации и электрического смещения, которые называют в совокупности полным током электрического смещения или просто током смещения. В полупроводниках возможны токи всех видов.
- В проводниках токи возникают за счет их включения в электрическую цепь; воздействие переменным магнитным полем (в металлах); индуцируемые высокочастотным электрическим полем (в проводниках II рода - электролитах). В первом случае в проводниках протекают токи проводимости: **электронной – в проводниках I рода и ионной – в проводниках II рода**. Индуцируемые в металлах переменным магнитным полем токи называют **вихревыми**, по природе они не отличаются от токов электронной проводимости. В электролитах высокочастотное электрическое поле возбуждает **токи поляризации**.

Количество теплоты, Дж, выделяющейся в единице объёма проводника в единицу времени (удельный тепловой поток),

$$\rho_v = J \cdot E = \gamma \cdot E^2,$$

а количество теплоты, выделившееся во всем объёме V за время τ ,

$$Q = \tau \int_V \gamma \cdot E^2 \cdot d \cdot V.$$

Если значения γ и E постоянны по объёму тела, то получим известное выражение закона Джоуля – Ленца

$$Q = \gamma \cdot E^2 \cdot V \cdot \tau = I^2 \cdot R \cdot \tau = U^2 \cdot \tau / R$$

3.3 Общие закономерности преобразования эл. энергии в другие виды

В диэлектриках электрическая энергия преобразуется в тепловую вследствие непрерывного смещения связанных зарядов – тока электрического смещения, протекающего под действием быстропеременного электрического поля. Протекание тока сопровождается работой сил поля по преодолению сопротивления вещества диэлектрика движению связанных зарядов. Затраченная полем энергия, эквивалентная этой работе, выделяется в диэлектрике в форме теплоты.

Для системы неподвижных тел при неменяющихся их свойствах, характеризуемых величинами $\varepsilon_a, \mu_a, \gamma$, и при отсутствии сторонних ЭДС баланс электромагнитной энергии, поступающей в тело, описывается теоремой Умова – Пойтинга:

$$-\oint \bar{\Pi} \cdot d\bar{A} = \int_V \gamma \cdot E^2 \cdot dV + \partial / \partial \tau \int_V \left(\frac{\varepsilon_a \cdot E^2}{2} + \frac{\mu_a \cdot H^2}{2} \right) \cdot dV$$

Уравнение выражает закон сохранения энергии электромагнитного поля в объеме V_2 поток энергии, поступающей в единицу времени в виде вектора Пойнтинга в объём V , огражденный замкнутой поверхностью A , расходуется на выделение в объеме V джоулевой теплоты:

$$P = \int_V \gamma \cdot E^2 \cdot dV$$

и на изменение энергии электромагнитного поля

$$\frac{\partial \cdot W}{\partial \cdot \tau} = \frac{\partial}{\partial \cdot \tau} \int_V \left(\frac{\varepsilon_a E^2}{2} + \frac{\mu_a \cdot H^2}{2} \right) \cdot d \cdot V$$

Данное выражение позволяет определить те преобразования энергии, которые происходят при изменении поля во времени.

3.4 Общие закономерности преобразования эл. энергии в другие виды

У-П Представим теорему Умова – Пойнтинга в комплексной форме:

$$S = -\oint \vec{P} \cdot d\vec{A} = \int_V \gamma \cdot E^2 \cdot dV + i \cdot 2\omega \int_V \left(\frac{\mu_a \cdot H^2}{2} - \frac{\varepsilon_a \cdot E^2}{2} \right) \cdot dV$$

Вещественная составляющая правой части представляет собой активную мощность P , а мнимая – реактивную мощность Q . Полная мощность в системе:

$$S = P + j \cdot Q$$

Вектор Пойнтинга $\vec{P} = [\vec{E} \cdot \vec{H}]$ направлен внутрь проводника, нормально к его боковой поверхности. Следовательно, энергия втекает в проводник из окружающей среды через поверхность $A = 2\pi \cdot r \cdot l$. Через основания цилиндра энергия не втекает, так как вектор \vec{P} касателен к ним. Поток энергии в единицу времени

$$|S| = P = E_t H A = (J / \gamma) \cdot (J_r / 2) \cdot 2\pi \cdot r \cdot l = (J^2 / \gamma) \cdot \pi \cdot r^2 l = \gamma \cdot E^2 \cdot V,$$

т.е. мы приходим к выражению, описывающему закон Джоуля - Ленца в дифференциальной форме.

3.5 Общие закономерности преобразования эл. энергии в другие виды

Прямое преобразование связано с большими расходами электрической энергии на тепловые процессы: невозможно получить на 1 кВт·ч затраченной электроэнергии более 3600 кДж теплоты. Этим объясняется все более возрастающая роль и значение косвенного преобразования, основанного на использовании тепловых насосов и теплообменных систем.

Наиболее распространены компрессионные (термомеханические) и полупроводниковые (термоэлектрические) тепловые насосы, которые переносят теплоту от холодной среды к более горячей.

Наиболее совершенны и перспективны термоэлектрические тепловые насосы, в которых промежуточным энергоносителем служит электрический ток. В основе метода лежат эффекты, наблюдаемые в цепи термоэлемента, составленного из двух спаянных по концам разнородных проводников. Если спаи поместить в среды с разными температурами, то появится разность потенциалов. Это явление носит название эффекта Зеебека, а возникающая на концах термоэлемента разность потенциалов - термоэлектродвижущей силой (термо - ЭДС).

Термо ЭДС зависит от свойств материалов, ветвей термоэлементов и разности температур спаев. В простейшем случае её определяют по выражению:

$$E = (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot (T_2 - T_1),$$

где α_1, α_2 - коэффициенты термо ЭДС ветвей термоэлементов, В/К; T_1, T_2 - температуры спаев, К.

Значение и знак коэффициентов термо ЭДС зависят от природы ветвей термоэлемента, например для никеля $\alpha = -20,8 \cdot 10^{-6}$ В/К, железа $\alpha = +11,6 \cdot 10^{-6}$ В/К и т.д.

3.6 Общие закономерности преобразования эл. энергии в другие виды

Пельтье

Если в цепь термоэлемента включить источник ЭДС и пропускать по ней постоянный электрический ток, то один спай будет охлаждаться и поглощать теплоту Φ_{Π} , а другой нагреваться и выделять её. Это явление носит название эффекта Пельтье.

Количество теплоты Пельтье Q_{Π} выделяемое или поглощаемое в спае за время τ при силе тока I :

$$Q_{\Pi} = \Pi / \tau = (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot T / \tau$$

где $\Pi = (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot T$ – коэффициент Пельтье, В; T – температура спая, К

Преобразование электрической энергии в механическую основано на использовании механических сил, испытываемых телами в электромагнитном поле. Иногда их называют электродинамическими, или пондеромоторными силами. Механическая работа в электромагнитном поле может совершаться лишь при перемещении или изменении размеров тела.

3.7 Общие закономерности преобразования эл. энергии в другие виды

В электрическом и магнитном полях разные по свойствам тела испытывают разные по характеру механические воздействия. Электрическое поле оказывает механические воздействия на заряженные и незаряженные диэлектрики, магнитное поле - на проводники стоком и без него. Однако все виды механических сил в электромагнитном поле имеют одну физическую основу - являются результатом взаимодействия полей с электрическими зарядами, входящими в состав тел: свободными или индуцированными полями.

Плотность механических сил для квазистационарных электрического $f_э$ и магнитного $f_м$ полей определяется выражениями:

$$f_э = \rho_з \cdot E - \frac{1}{2} \cdot E^2 \cdot grad \varepsilon + \frac{1}{2} grad(E^2 \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho_д} \cdot \rho_д);$$

$$f_м = [\bar{J} \cdot \bar{B}] - \frac{1}{2} \cdot H^2 \cdot grad \mu + \frac{1}{2} \cdot grad(H^2 \cdot \frac{\partial \mu}{\partial \rho_п} \cdot \rho_п)$$

где $\rho_з$ - плотность свободных зарядов в диэлектрике; $\rho_д$ и $\rho_п$ - плотность вещества диэлектриков и проводников.

3.8 Общие закономерности преобразования эл. энергии в другие виды

УЗ

Первая составляющая правой части равенства представляет собой объемную механическую силу, испытываемую в электрическом поле свободными зарядами диэлектриков. Вторая и третья составляющие правой части выражения представляют собой силы, действующие на диэлектрики при их поляризации.

Под действием этих сил некоторые виды диэлектриков (кварц, титанат бария и др.) деформируются в электрическом поле. Это явление, известное как электрострикция, или обратный пьезоэлектрический эффект, широко используется для преобразования электрической энергии в энергию механических ультразвуковых колебаний.

Первая составляющая сил f_m представляет собой механическую силу, действующую на проводник с током в магнитном поле. Её нетрудно представить известной формулой для силы, действующей на элемент проводника dl с током I ,

$$\vec{F} = I \cdot [\vec{dl} \cdot \vec{B}],$$

которая лежит в основе электромеханического способа преобразования энергии в электродвигателях и других преобразователях.

3.9 Общие закономерности преобразования эл. энергии в другие виды

Взаимодействие магнитного поля с молекулярными токами магнетиков создает в телах объемные механические силы двух видов:

силу, пропорциональную величине H^2 (вторая составляющая f_m), под действием которой в неоднородных магнитных полях магнетики втягиваются или выталкиваются в область наибольшей напряженности поля. На этом основано, например, действие электромагнитов;

силу пропорциональную $\text{grad } H^2$, под действием которой некоторые виды металлов и сплавов (железо, никель, пермаллой и др.) деформируются в магнитном поле. Это явление известно как магнитострикция, которую, как и электрострикцию, широко используют в ультразвуковой технике.

В основе преобразования электрической энергии в химическую лежит явление электролиза, состоящее в том, что электрический ток способен выделять из электролитов, помещенных между электродами, частицы вещества, осаждают на электродах и интенсифицировать из взаимодействие.

Биологическое действие электрического поля (тока) зависит от его параметров: напряженности E поля, амплитудного значения плотности тока J , частоты ω , формы тока Φ , времени воздействия τ эффект \mathcal{E} является сложной функцией перечисленных факторов:

$$\mathcal{E} = F(E, J, \omega, \Phi, \tau),$$

а также их парных и тройных сочетаний, причем для каждого объекта требуются свои параметры тока (поля) и режимы воздействия.

4.1 Способы преобразования электрической энергии в тепловую

При электрическом нагреве в материале создаётся электрическое поле.

Способы его образования могут быть различными:

- электрическое поле в проводнике создаётся при непосредственном его подключении к источнику Э.Д.С. Под действием поля свободные заряды (ионы, электроны) начинают перемещаться, приобретая кинетическую энергию. Сталкиваясь с нейтральными атомами и молекулами, они отдают запас кинетической энергии, который расходуется на увеличение теплового движения частиц, и температура вещества повышается.
- электрическое поле в проводнике, расположенном в индукторе, наводится переменным магнитным полем. Наведённое электрическое поле вызывает движение свободных зарядов, энергия которых, как и в первом случае, превращается в теплоту.
- электрическое поле в диэлектрике, находящемся в конденсаторе, вызывает движение связанных зарядов, которые под влиянием электрического поля смещаются один относительно другого только в некоторых пределах. Смещение происходит с «трением», что приводит к выделению теплоты.

4.2 Способы преобразования электрической энергии в тепловую

С точки зрения термодинамики, **теплота** – это мера внутренней энергии системы, связанная с молекулярным (тепловым) движением, независящая от механического движения тел или их взаимного расположения. Изменение внутренней энергии происходит под действием внешних факторов и может осуществляться либо затратой работы, либо путём теплообмена. Преобразование электрической энергии в тепловую энергию сопровождается затратой работы (энергии) электромагнитного поля.

Существуют два термодинамических обратных способа или две схемы преобразования электрической энергии в тепловую энергию : схема прямого преобразования и схема косвенного преобразования.

Принцип прямого преобразования энергии электромагнитного поля в тепловую состоит в том, что энергия поля тем или иным способом передаётся (сообщается) атомам или молекулам нагреваемой среды и расходуется на повышение интенсивности их теплового движения.

Косвенное преобразование. Принцип косвенного преобразования состоит в том, что электрическая энергия в тепловую энергию не превращается, а используется лишь для переноса теплоты от одной среды (источника теплоты) к другой (потребителю теплоты), причём температура источника теплоты может быть ниже температуры приёмника.

4.3 Способы преобразования электрической энергии в тепловую

Электротермические установки (ЭТУ) классифицируют по следующим признакам:

- по способу превращения электрической энергии в тепловую и другим признакам;
- по роду тока;
- по частоте тока;
- по способам теплопередачи;
- по технологическому назначению;
- по напряжению питания;
- по рабочей температуре.

Классификация ЭТУ по способу преобразования электрической энергии в тепловую:

- нагрев сопротивлением прямой и косвенный;
- нагрев электрической дугой (электродуговой нагрев);
- нагрев в переменном магнитном поле – индукционный способ;
- нагрев в переменном электрическом поле – диэлектрический способ;
- нагрев электронным пучком;
- нагрев квантами (инфракрасный, лазерный способы нагрева);
- плазменный нагрев;
- термоэлектрический нагрев.

4.4 Способы преобразования электрической энергии в тепловую

Классификация электротермических установок по роду тока:

- постоянного тока;
- переменного тока.

Классифицируют электротермические установки по частоте тока:

- промышленной частоты (50 Гц);
- повышенной частоты;
- высокой частоты;
- сверхвысокой частоты.

По виду нагрева ЭТУ можно разделить на 2 группы:

- прямого нагрева;
- косвенного нагрева.

Электротермические установки по режиму работы делят на 2 группы:

- непрерывного действия;
- периодического действия.

По рабочей температуре различают ЭТУ:

- низкотемпературные (до 500...6000С);
- среднетемпературные (до 12500С);
- высокотемпературные (свыше 12500С).

4.5 Способы преобразования электрической энергии в тепловую

Электротермические установки классифицируются по напряжению:

- до 1кВ;
- выше 1кВ;
- безопасного напряжения.

По технологическому назначению ЭТУ разделяют на:

- универсальные;
- специальные.

ЭТУ предназначены для выполнения определённых технологических операций и, следовательно, при их проектировании определяющими являются именно технологические требования.

При проектировании ЭТУ, необходимо иметь, прежде всего, техническое задание, совместно разработанное и согласованное с технологами и инженерами. В техническом задании оговаривается назначение электротермической установки, её производительность, температурные режимы, скорость нагрева, условия эксплуатации, требования техники безопасности, особенности окружающей среды, условия электроснабжения, требования к автоматизации, пределы регулирования мощности или производительности.

Различают проверочный и конструктивный (проектный или полный) расчёт электротермических установок.

4.6 Способы преобразования электрической энергии в тепловую

Полный расчёт электротермической установки включает в себя тепловой, электрический, аэродинамический, гидравлический и механический.

Тепловой расчёт проводят с целью определения технических данных установок (мощности, температуры поверхности нагревательных элементов, интенсивности теплоотдачи, параметров тепловой изоляции, теплового КПД), обеспечивающих технологические требования, которые определяют по единой для всех электротермических установок методике.

Электрический расчёт тесно связан с тепловым и состоит в выборе напряжения питания, рода тока, частоты, в определении геометрических размеров нагревателя, электрического КПД и коэффициента мощности, разработке схемы управления и способа регулирования мощности или производительности.

Аэродинамический расчёт связан с нахождением расхода воздуха (газа), проходящего через установку, выбором вентиляторов, определением сечения воздухопроводов и размеров распределительных решёток.

От правильности решения этого вопроса зависит теплоотдача нагревательных элементов, а, следовательно, срок службы, тепловой и электрической КПД.

Гидравлический расчёт выполняют для определения расхода жидкости через установку, выбора насоса и сечения трубопровода.

Механический расчёт проводят с целью определения геометрических размеров установки, массы, материалоемкости и её механической прочности.

5 Кинетика нагрева однородного тела и его анализ

Кинетика нагрева.

Процессы нагрева электротермических установок, их отдельных элементов, а также нагреваемых материалов являются динамическими. Рассмотрим процесс изменения температуры электротермической установки или нагреваемого материала во времени.

Допустим, что:

- электротермическая установка или нагреваемый материал представляют собой однородные тела и обладают бесконечно большой теплопроводностью, поэтому температура во всех их точках одинакова;
- тепловой поток в окружающую среду пропорционален разности температур электротермической установки $t_{эту}$ или материалов t_m и окружающей среды $t_{окр}$

$$\theta = t_{эту} - t_{окр} = (t_m - t_{окр});$$

- теплоёмкость C , теплоотдача kF и мощность P электротермической установки или материала от температуры не зависят;
- температура окружающей среды в процессе разогрева не изменяется.

Кинетика нагрева однородного тела и его анализ

- Уравнение теплового баланса за время dt :
- (1) $dQ = dQ_1 + dQ_2$ [Дж]. Для упрощения принято, что физические параметры тела, кроме температуры не изменяются. Количество теплоты, подводимого к телу за время dt : $dQ = P \cdot dt$; количество теплоты, идущее на изменение теплосодержания тела: $dQ_1 = m \cdot c \cdot dt$; C -удельная теплоемкость тела [Дж/ кг·°C]; тепловые потери в окружающую среду: $dQ_2 = k \cdot F \cdot \Theta \cdot dt = k \cdot F \cdot (t - t_0) \cdot dt$. k – коэффициент теплопередачи от нагреваемого тела в окружающую среду [Вт/м²·°C].
- Тогда, уравнение теплового баланса (1) можно записать в следующем виде:
- $P \cdot dt = m \cdot c \cdot dt + k \cdot F \cdot (t - t_0) \cdot dt$ или $m \cdot c \cdot dt + k \cdot F \cdot (t - t_0) \cdot dt - P \cdot dt = 0$; (2)
- Преобразуем уравнение (2) делением на $(k \cdot F \cdot dt)$: $m \cdot c \cdot dt / k \cdot F \cdot dt + (t - t_0) - P/kF = 0$.
- Обозначим отношение: $(m \cdot c / k \cdot F) = T$; перегруппируем t , t_0 и P/kF .
- $m \cdot c \cdot dt / k \cdot F \cdot dt + t - (t_0 + P/kF) = 0$, принимаем $(t_0 + P/kF) = t_y$, тогда получим:
- $T \cdot dt / dt + t - t_y = 0$ (дифференциальное уравнение 1-го порядка), его решение дает окончательное уравнение:
- $t = t_n \cdot \exp(-t/T) + t_y [1 - \exp(- t/T)]$, t_n – температура тела в начальный момент времени $t = 0$
-

5.1 Кинетика нагрева однородного тела и его анализ

Кинетика нагрева

Дифференциальное уравнение теплового баланса за время $d\tau$ имеет вид:

$$P \cdot d\tau = m \cdot c \cdot d\theta + k \cdot F \cdot \theta \cdot d\tau$$

где $P \cdot d\tau$ – подводимая тепловая энергия или теплота, выделяющаяся в нагревателе установки;

$m \cdot c \cdot d\theta$ - часть теплоты, выделяющаяся в материале (и идущая на повышение его температуры) или запасаемая в элементах электротермической установки; $k \cdot F \cdot \theta \cdot d\tau$ – часть теплоты, рассеиваемая в окружающую среду.

Разделив переменные, получим:

$$d\tau = \frac{m \cdot c \cdot d\theta}{P - k \cdot F \cdot \theta},$$

Время нагрева τ – один из параметров, определяющий режим нагрева материала или электротермической установки.

5.2 Кинетика нагрева однородного тела и его анализ

Кинетика нагрева

Проинтегрировав выражение и определив постоянную интегрирования из нулевых начальных условий получим, что время нагрева равно:

$$\tau = \frac{m \cdot c}{k \cdot F} \cdot \ln \cdot \frac{P}{P - k \cdot F \cdot \theta}.$$

Величина постоянной интегрирования T называется постоянной времени нагрева и может быть определена как:

$$T = \frac{c \cdot m}{k \cdot F}$$

Тогда выражение примет вид:

$$\tau = T \cdot \ln \cdot \frac{P}{P - k \cdot F \cdot \theta}, \quad \tau = T \cdot \ln \cdot \frac{t_0 - t_i}{t_0 - t},$$

где $t_H - t_0 = \theta_H$; $t - t_0 = \theta$; $t_y - t_0 = \theta_y$.

5.3 Кинетика нагрева однородного тела и его анализ

Кинетика

Превышение температуры нагрева при условии, что разогрев идёт из холодного состояния, определяется по формуле:

$$\theta = \frac{P}{k \cdot F} \cdot (1 - e^{-\tau/T}) = \theta_{уст} (1 - e^{-\tau/T}).$$

При $\tau = \infty$ превышение температуры принимает установившееся значение:

$$\theta_{уст} = \frac{P}{k \cdot F}.$$

Практически, установившийся режим наступает при $\tau = (3 \dots 4)T$.

Если разогрев идёт не из холодного состояния, то формула, с учётом этого обстоятельства, примет вид:

$$\theta = \theta_{уст} (1 - e^{-\tau/T}) + \theta_0 \cdot e^{-\tau/T}$$

Нетрудно показать, что при $\tau = T$ превышение температуры равно:

$$\theta = 0,632 \cdot \theta_{уст}.$$

5.4 Кинетика нагрева однородного тела и его анализ

Кинетика

На основании выражения постоянную времени нагрева T можно определить как промежуток времени, за который превышение температуры достигает значения $0,632 \cdot \theta_{уст}$.

При отключении ЭТУ материал и сама установка охлаждаются и тогда уравнение можно переписать в виде:

$$m \cdot c \cdot d\theta + k \cdot F \cdot \theta \cdot d\tau = 0.$$

Если охлаждение начинается с установившегося значения превышения температуры $\theta_{уст}$, то уравнение примет вид:

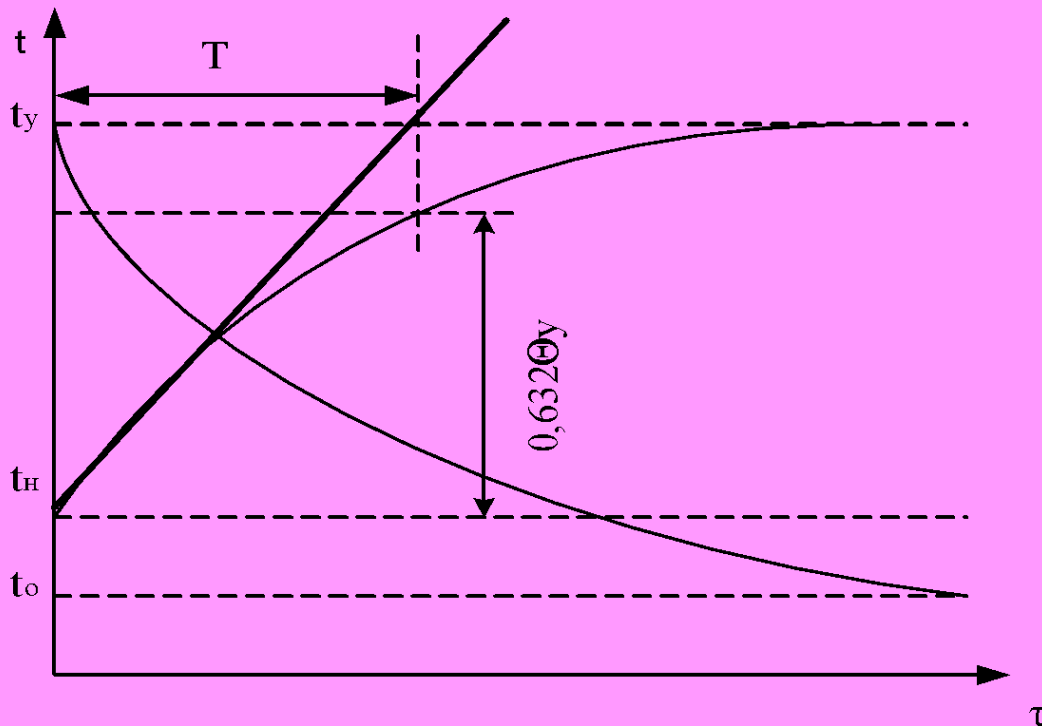
$$\theta = \frac{P}{\alpha \cdot F} \cdot e^{-\tau/T} = \theta_{уст} \cdot e^{-\tau/T}$$

В этом выражении величину T следует называть постоянной времени охлаждения. При $\tau = T$ превышения температуры достигает значения:

$$\theta = 0,37 \cdot \theta_{уст}$$

5.5 Кинетика нагрева однородного тела и его анализ

Кривые нагрева и охлаждения однородного тела.



Экспоненциальный характер изменения превышения температуры при нагреве и охлаждении свидетельствует о том, что их скорости изменяются во времени.

Все процессы нагрева и охлаждения нестационарные, так как связаны с изменением теплосодержания материала и его температуры. Тепловое равновесие возникает, если поступающая тепловая энергия равна её расходу.

5.6 Уравнение теплового баланса и мощность ЭТУ

- тепловая энергия в электротермической установке
- полезно расходуется на:
- - нагрев или фазовое преобразование материала (например, испарение, плавление);
- - нагрев вспомогательных устройств (например, крепеж, кожух, упаковка, тара).

уравнение теплового баланса:

- $Q_{эн} + Q_б + Q_{зо} = Q_{пол} + Q_{всп} + Q_{пот}$,
- где $Q_{эн}$, $Q_б$, $Q_{зо}$ – тепловая энергия электронагревателей; биологических объектов и работающего технологического оборудования и электрооборудования, Дж;
- $Q_{пол}$ – тепловая энергия расходуемая полезно, Дж;
- $Q_{всп}$ – тепловая энергия, затрачиваемая на нагрев вспомогательных устройств, Дж;
- $Q_{пот}$ – энергия тепловых потерь, Дж.

Мощность электротермической установки :

- $P_{уст} = P_{потр} \cdot k_з / \eta_m \eta_э$, где $P_{потр}$ – потребляемая мощность, Вт;
- η_m , $\eta_э$ - тепловой и электрический КПД; $k_з$ - коэффициент запаса (1.1 – 1.3)
- Потребная мощность электротермической установки:
- $P_{потр} = P_{пол} + P_{всп} + P_{пот}$,
- где $P_{пол}$ – полезная тепловая мощность, Вт;
- $P_{всп}$ – мощность, идущая на нагрев вспомогательных устройств, Вт;
- $P_{пот}$ – мощность тепловых потерь, Вт.

5.7 Определение количества теплоты

Определение количества теплоты для установок непрерывного и периодического действия.

Для электротермической установки периодического действия полезная теплота:

$$Q_{пол} = V \cdot \rho \cdot c \cdot (t_2 - t_1)$$

где V – объём материала, м³;

ρ – плотность материала, кг/м³;

c – удельная теплоёмкость материала, Дж/кг·°С;

t_2 – конечная заданная температура, °С;

t_1 – начальная температура материала, °С.

Полезная мощность:

$$P_{пол} = \frac{Q_{пол}}{\tau} = \frac{V \cdot \rho \cdot c \cdot (t_2 - t_1)}{\tau},$$

где τ – время нагрева, с

Для электротермической установки непрерывного действия полезная теплота:

$$Q_{пол} = L \cdot \rho \cdot c \cdot (t_2 - t_1),$$

где L – объёмная подача нагреваемого материала в ЭТУ, м³/с.

5.8 Определение количества теплоты

При нагреве и плавлении.

При нагреве материала и его плавлении полезная теплота определяется по формуле:

$$Q_{пол} = V \cdot \rho \cdot c \cdot (t_2 - t_1) + V \cdot \rho \cdot a_t,$$

где a_t – удельная теплота плавления материала, Дж/кг.

При нагреве материала и его испарении полезная теплота определится по формуле:

$$Q_{пол} = V \cdot \rho \cdot c \cdot (t_2 - t_1) + V \cdot \rho \cdot r_t,$$

где r_t – удельная теплота испарения материала, Дж/кг.

Мощность, затрачиваемую на нагрев вспомогательных устройств, находят по формулам расчёта полезной мощности, причём температуру вспомогательного оборудования принимают равной температуре нагреваемого материала.

Тепловые потери электротермических установок связаны с тремя способами передачи теплоты: теплопроводностью, конвекцией и излучением, причём в установках передача тепла может осуществляться одновременно двумя или всеми тремя перечисленными способами.

5.9 Определение теплового потока

Тепловой поток (Вт) при конвективном теплообмене рассчитывают по формуле Ньютона:

$$\Phi = \alpha \cdot F \cdot \Delta t = \alpha \cdot F \cdot (t_c - t_{жс})$$

где Δt – разность температур на стенке t_c и потока жидкости (или газа) $t_{жс}$, °С;

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·°С;

F – площадь поверхности теплообмена, м².

Излучение – процесс переноса теплоты от одного тела к другому посредством электромагнитных волн через разделяющую тела (прозрачную для волн) среду.

Плотность теплового потока (Вт/м²), передаваемого от излучателя, имеющего температуру T_1 , к нагреваемому телу с температурой T_2 , определяют по формуле закона Стефана-Больцмана:

$$\phi = 5,7 \cdot c_{np} \cdot \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right) = \frac{\Delta t}{R_c}$$

где $\Delta t = (t_1 - t_2)$ – разность температур излучателя $t_1 = (T_1 - 273)$ и нагреваемого тела $t_2 = (T_2 - 273)$, °С; R_c – термическое сопротивление излучению, м²·°С/Вт. Термическое сопротивление излучению:

$$R_c = \frac{\Delta t}{5,7 c_{np} \cdot \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right)}$$

5.10 Расчет ЭТУ

Производительность электротермической установки периодического действия:

$$L = \frac{V \cdot \rho}{\tau}$$

где τ – полное время работы установки.

Для электротермических установок непрерывного действия размеры рабочего пространства также определяются её производительностью:

$$L = v \cdot \rho \cdot F$$

где v – скорость поступления материала в рабочее пространство, м/с;

F – площадь сечения рабочего пространства, м².

Длина рабочего пространства:

$$l = \frac{L \cdot \tau}{\rho \cdot F}$$

где τ – время нахождения материала в рабочем пространстве установки.

Общий КПД электротермических установок:

$$\eta_{\text{общ}} = \eta_{\text{Э}} \cdot \eta_{\text{т}}$$

Электрический КПД зависит главным образом от способа электронагрева:

- нагрев методом сопротивления - $\eta_{\text{Э}} \approx 1,0$;
- электродуговой нагрев - $\eta_{\text{Э}} \approx 1,0$;
- индукционный нагрев - $\eta_{\text{Э}} = 0,5 - 0,7$;
- диэлектрический нагрев (установки ВЧ) - $\eta_{\text{Э}} = 0,4 - 0,5$;
- диэлектрический нагрев (установки СВЧ) - $\eta_{\text{Э}} = 0,7$.

5.11 Расчет ЭТУ

Термический КПД показывает, какая часть тепловой энергии, выделенной в нагревателе ЭТУ, идёт на повышение теплосодержания материала.

Для практических расчётов термический КПД можно определить по формулам:

$$\eta_m = \frac{Q_{пол}}{Q_{пол} + Q_{всп} + Q_{пот}},$$

или
$$\eta_m = \frac{P_{пол}}{P_{пол} + P_{всп} + P_{пот}},$$

Удельный расход электрической энергии определяют на единицу объёма или массы нагреваемого материала, при обогреве поверхности – на единицу площади и т.д.

Удельный расход электрической энергии на единицу объёма определяют по формуле:

- для установок периодического действия:

$$\omega = \frac{P_{уст} \cdot \tau}{V}.$$

б) для установок непрерывного действия:

$$\omega = \frac{P_{уст}}{L}.$$

5.12 Схемы соединения и определение мощности

Для трёхфазных электротермических установок, у которых элементы в секциях соединены по схеме «звезда»:

$$P_{зв} = 3 \cdot U_{\phi} \cdot I_{\phi} = \frac{3 \cdot U_{\phi}^2}{R_{1H}} = \frac{U_{Л}^2}{R_{1H}}$$

Для трёхфазных электротермических установок, у которых элементы в секциях соединены по схеме «треугольник»:

$$P_{тр} = 3 \cdot U_{\phi} \cdot I_{\phi} = \frac{3 \cdot U_{Л}^2}{R_{1H}}$$

Отношение мощностей:

$$\frac{P_{тр}}{P_{зв}} = \frac{3}{1}$$

5.13 Нагрев сопротивлением

В технологических процессах широко используют электронагрев сопротивлением. При котором, электрическая энергия преобразуется в тепловую непосредственно в проводящей среде или проводниках, включённых в цепь электрического тока.

В электротермических установках низкотемпературного нагрева, (до 673...873 К) теплообмен происходит в основном за счёт теплопроводности и конвекции. Такие установки применяют для нагрева воздуха, воды, для сушки с.х. материалов и других процессов.

Электротермические установки средне – и высокотемпературного нагрева используют для закалки, отжига, термической обработки металлов и т.д. В этих установках температура нагреваемого материала или среды может достигать 1473...1523 К, а процессы теплообмена осуществляются за счёт конвекции и излучения.

Количество теплоты, выделенное в нагреваемом материале или среде, зависит от квадрата силы тока I , сопротивления нагреваемого материала R и времени нагрева τ и определяется по закону Ленца - Джоуля:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot \tau$$

Электронагрев сопротивлением – наиболее простой и экономичный способ преобразования электрической энергии в тепловую. По способу выделения и передачи тепловой энергии нагреваемой среде или материалу различают прямой и косвенный нагрев.

5.14 Нагрев сопротивлением

Прямой нагрев сопротивлением применяют для электропроводящих сред и материалов. Нагрев осуществляется за счёт прохождения электрического тока непосредственно через нагреваемую среду или материал (деталь). Прямой нагрев сопротивлением, в свою очередь подразделяется на два способа:

- прямой нагрев сопротивлением металлических тел, называемый **электроконтактным**;
- прямой нагрев проводящих материалов, обладающих ионной проводимостью, который называется **электродным**.

Косвенный нагрев сопротивлением используется для проводящих и непроводящих материалов. При данном способе нагрев среды или материала осуществляется за счёт теплопроводности, конвекции и излучения от специальных нагреваемых элементов при протекании по ним электрического тока.

В зависимости от характера свободных электрических зарядов принято различать **проводники первого и второго рода**. Под действием электрического поля в проводниках первого рода (металлы) свободные заряды (электроны) направленно перемещаются. В проводниках второго рода (электролиты и др.) под действием электрического поля перемещаются ионы.

5.15 Нагрев сопротивлением (проводники)

Проводники I и II рода характеризуются различной способностью проводить электрический ток. Сопротивление проводника, Ом, сечение которого по всей длине постоянно:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S}$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление материала проводника, Ом·м;

l – длина проводника, м;

S – площадь поперечного сечения проводника, м².

С увеличением температуры проводника возрастает и его сопротивление, которое определяется по формуле:

$$\rho_t = \rho_{20} (1 + \alpha\theta + \beta\theta^2 + \gamma\theta^3 + \dots),$$

где ρ_{20} – удельное электрическое сопротивление при температуре 20 °С, Ом·м;

α , β , $\gamma = const$ – постоянные коэффициенты.

При невысоких температурах проводниковых материалов (< 300 °С) можно записать:

$$\rho_t = \rho_{20} (1 + \alpha\theta).$$

5.16 Электроконтактный нагрев

Электроконтактный нагрев связан с преобразованием электрической энергии в теплоту непосредственно в металлическом нагреваемом изделии (детали) и применяется при нагреве заготовок или деталей из чёрных и цветных металлов, для термической обработки (закалка, отпуск, отжиг), а так же с целью контактной электрической сварки давлением.

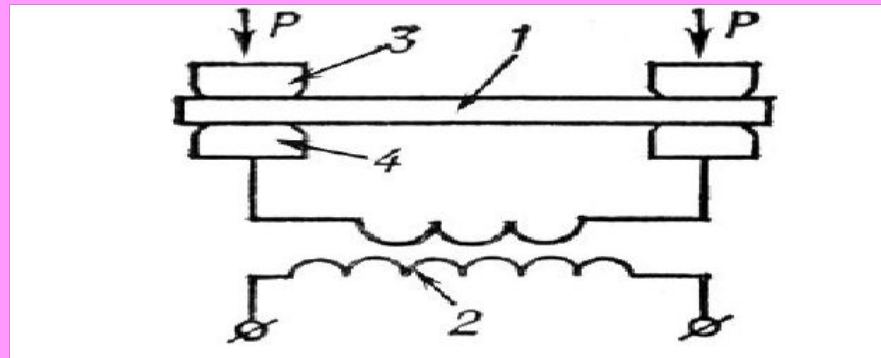


Рисунок 5.2 - Схема установки для электроконтактного нагрева

Мощность при электроконтактном нагреве, выделяемую в единицу времени можно найти:

$$P = U \cdot I = I^2 \cdot R = \dots$$

Так как сопротивление металлических тел с хорошей проводимостью небольшое, для прямого их нагрева требуются значительные токи (сотни и тысячи ампер) при напряжении всего $U = 5 \dots 25 \text{ В}$. Поэтому для этих целей применяют переменный ток благодаря относительной простоте получения низкого напряжения

5.17 Электроконтактный нагрев

при протекании переменного тока у металлических деталей проявляется поверхностный эффект, заключающийся в неравномерном распределении плотности тока по сечению проводника, которая экспоненциально уменьшается по направлению к его оси, т.е.

$$j_x = j_m \cdot e^{-x/z_0}$$

где j_x – плотность тока в слое проводника на расстоянии x от поверхности, А/мм²;

j_m – плотность тока в слое проводника на поверхности проводника, А/мм²;

Z_0 – эквивалентная глубина проникновения тока, м.

При глубине проникновения тока $x = z_0$, считается, что в этом слое выделяется около 90% общего количества теплоты.

Эквивалентная глубина проникновения тока – расстояние от поверхности проводника, на котором плотность тока в $e = 2,71$ раза меньше, чем на поверхности

$$Z_0 = 503 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r \cdot f}}$$

где μ_r – магнитная проницаемость материала проводника.

Если нагрев осуществляется на частоте $f = 50$ Гц, то

$$Z_0 = 71,2 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\mu}}$$

5.18 Электроконтактный нагрев

В устройствах и установках электроконтактного нагрева определяют не параметры нагревательных устройств, а параметры источника питания.

Для выбора трансформатора необходимо знать полную мощность $S_{тр}$ и вторичное напряжение U_2 .

Если, известна масса детали m ; начальная $t_1 = t_{нач}$ и конечная $t_2 = t_{кон}$ температуры, а так же время в течении которого осуществляется нагрев τ , то:

$$P_{пол} = \frac{m \cdot c \cdot (t_2 - t_1)}{\tau}$$

а общая потребная мощность:

$$P_{общ} = \frac{P_{пол}}{\eta} = \frac{P_{пол}}{\eta_m \cdot \eta_s}$$

где $\eta = 0,55 \dots 0,82$

Чтобы η был максимальным по значению необходимо, чтобы значение суммарного сопротивления вторичной обмотки понижающего трансформатора, соединительных проводов и контактов должно быть минимальным.

Среднее значение вторичного напряжения за время нагрева:

$$U_2 = \sqrt{R \cdot P_{общ}}$$

где R – среднее значение сопротивления детали на переменном токе за время нагрева, Ом.

Тогда:

$$S_{тр} = \frac{P_{общ}}{\eta_{тр} \cdot \cos \varphi} \cdot \sqrt{ПВ}$$

где $\eta_{тр} = 0,9 \dots 0,95$; $\cos \varphi = 0,6 \dots 0,85$ – средний $\cos \varphi$;

$ПВ$ – относительная продолжительность включения.

6 Электродный нагрев

В электродных нагревателях материал с ионной проводимостью, заключённый между электродами, образует проводник, в котором при протекании электрического тока выделяется теплота, используемая для нагрева воды, молока, почвы и т.д. Применяется в основном переменный ток, т.к. при постоянном токе возникает электролиз. Но и на переменном токе необходимо контролировать плотность тока (т.к. при больших плотностях также возникает электролиз).

- Электродный нагрев отличается простотой реализации, высоким КПД, невысокой стоимостью материалов и оборудования. Но одновременно с этим он обладает и рядом недостатков:
 - нагреваться могут только электропроводящие материалы;
 - в процессе нагрева значительно изменяется мощность;
 - повышенная электроопасность;
 - под действием проходящего тока изменяется качество нагреваемого материала.
- В качестве материала электродов можно использовать различные проводники, но они должны противостоять коррозии и не давать токсичных оксидов.
- **Наиболее распространены электродные системы:**
 - из электродов изогнутых под углом 120° ;
 - из коаксиальных (цилиндрических) электродов;
 - из плоских электродов, но для обеспечения симметричной нагрузки питающей сети принимают число электродов равное $3n+1$, где n – целое число.

6.1 Электродный нагрев

Схема замещения зависит от конструкции систем. Если ёмкости изготовлены из электроизоляционного материала, то схемы замещения соединения электродных систем представляют собой «треугольник», или «звезду». В том случае если используются электропроводящие емкости, то все схемы замещения – «звезда».

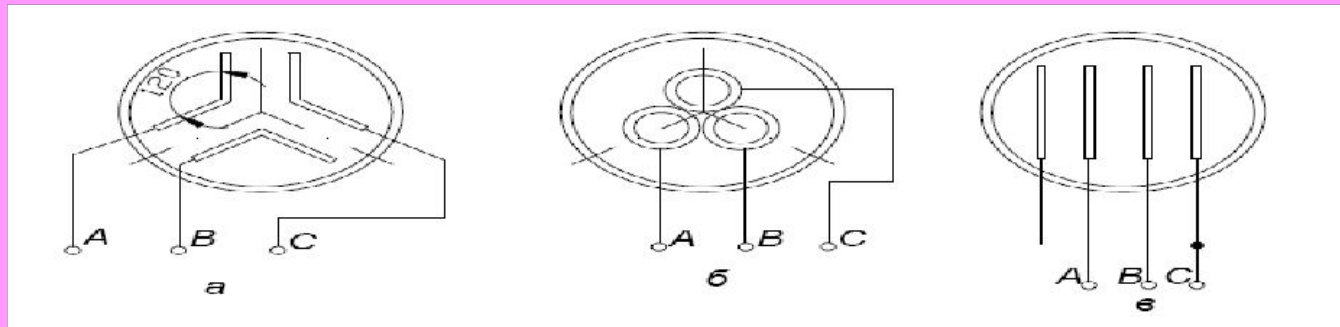


Рисунок 6.1 - Конструкция основных типов электродных нагревателей:
а – электроды, изогнутые под углом 120°;
б - коаксиальные цилиндрические электроды;
в - плоские электроды

Если рассмотреть устройство с одной парой плоских электродов, то её мощность составляет:

$$P = \frac{U^2 \cdot \gamma \cdot S}{l},$$

где U – межэлектродное напряжение, В;

γ – удельная электрическая проводимость, $\text{См} \cdot \text{м}^{-1}$;

S – площадь электрода, м^2 ;

l – расстояние между электродами, м.

6.2 Электродный нагрев

Так как $U = const$, $S = const$ и $l = const$, а изменяется только удельная электрическая проводимость γ в процессе нагрева, то мощность в зависимости от температуры нагрева можно определить как (для $\alpha = 0,025$ $1/^\circ\text{C}$):

$$P = P_{20} \cdot \frac{(t + 20)}{40}.$$

При закипании воды мощность нагревателя снижается на 25%, так как уменьшается удельная электрическая проводимость за счёт образования пузырьков.

Максимальная плотность тока на электродах и в соприкасающихся с ними объёмах нагреваемого материала ограничивается условиями недопустимости процесса электролиза. Предельная плотность тока $j_{\text{дон}}$ (A/cm^2) не приводящая к электролизу, зависит от конструкции электродных систем.

Для плоских электродов $j_{\text{дон}} = 0,5 \text{ A}/\text{cm}^2$ или определяется по формуле:

$$J_{\text{дон}} = \frac{16}{\sqrt{\rho_2}},$$

где ρ_2 – удельное электрическое сопротивление нагреваемого материала при температуре t^2 , Ом·см.

Для электродов цилиндрической формы: $J_{\text{дон}} = 1,5 \dots 2 \text{ A}/\text{cm}^2$.

6.3 Электродный нагрев

Плотность тока определяется значением удельного электрического сопротивления при напряжении $U = const$; площади электродов $S = const$ и расстоянии между электродами $l = const$. Напряжённость электрического поля в нагреваемом материале, зависящая от U и l , во время работы остаётся неизменной. Для плоскопараллельных электродов:

$$j = \frac{U}{\rho \cdot l} .$$

Для коаксиальных цилиндров:

$$j = \frac{U}{\rho \cdot r \cdot \ln(r_1 / r_2)} ,$$

где r – текущий радиус точки в межэлектродном промежутке, м; r_1 и r_2 – радиусы наружного и внутреннего электродов, м.

Связь между напряжённостью электрического поля E и плотностью тока j :

$$E = j \cdot \rho .$$

Для плоскопараллельных электродов:

$$E = \frac{U}{l} .$$

Для коаксиальных цилиндров:

$$E = \frac{U}{r \cdot \ln(r_1 / r_2)} .$$

6.4 Электродный нагрев

При расчёте электродных нагревательных устройств определяют потребную мощность и конструктивные параметры электродной системы. Потребную мощность находят с учётом технологических условий, которые характеризуют производственный процесс.

Для нагревателей периодического действия такими параметрами являются: объём нагреваемого материала V (м^3), удельная теплоёмкость c ($\text{Дж/кг}\cdot^{\circ}\text{C}$), плотность материала δ (кг/м^3), удельное электрическое сопротивление ρ ($\text{Ом}\cdot\text{м}$), время нагрева τ (с), начальная t_1 и конечная t_2 температуры ($^{\circ}\text{C}$), термический к.п.д. η_m .

Для нагревателей непрерывного действия задаётся производительность L ($\text{м}^3/\text{с}$) установки.

Потребная мощность определяется по выражению:

$$P_{\text{номр}} = \frac{P_{\text{пол}}}{\eta_m}.$$

Это выражение справедливо лишь для нагревателей непрерывного действия. Для нагревателей периодического действия при возрастании мощности от P_1 при температуре t_1 до P_2 при t_2 . Значение мощности определяется удельным сопротивлением материала при соответствующих температурах:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{t_1 + 20}{t_2 + 20};$$

$$P_{\text{номр}} = \frac{P_1 + P_2}{2}.$$

Мощность P_2 определяется как

$$P_2 = \frac{2 \cdot P_{\text{номр}}}{1 + \left(\frac{t_1 + 20}{t_2 + 20} \right)}.$$

6.5 Электродный нагрев

Расчётная мощность:

- для однофазных нагревателей,

$$P_{расч} = P_2;$$

- для трёхфазных нагревателей,

$$P_{расч} = \frac{1}{3} \cdot P_2$$

Расчётный ток нагревателя:

$$I_{расч} = \frac{P_{расч}}{U}.$$

При использовании нагревателей в виде двух плоскопараллельных пластин, размещённых в ёмкости из электроизоляционного материала (при $j < j_{дон}$) рабочая площадь, см², каждого из электродов:

$$S = \frac{I_{расч}}{j}.$$

По значению рабочей площади электродов S , с учётом конструктивных ограничений, определяют высоту h (см) и ширину b (см) электродов так, чтобы $h \cdot b = S$, а межэлектродное расстояние, см:

$$l = \frac{U^2 \cdot S}{\rho_2 \cdot P_{расч}},$$

где ρ_2 - удельное электрическое сопротивление материала при t_2 , Ом·см.

Определяют действительную напряжённость электрического поля E и сравнивают с её допустимым значением $E_{дон}$.

6.6 Электродный нагрев

Для цилиндрических коаксиальных электродов определяют площадь S внутреннего электрода. Приняв один из параметров h (высоту электродов) или d_2 (диаметр внутреннего электрода), рассчитывают другой параметр как $S = \pi \cdot d_2 \cdot h$. Затем находят диаметр внешнего электрода:

$$d_1 = d_2 \cdot e^{2\pi \cdot h \cdot U^2 / P_{расч} \cdot \rho_2} .$$

Межэлектродное расстояние:

$$l = \frac{d_1 - d_2}{2} .$$

Определяют действительную напряжённость электрического поля E .
При расчёте однофазных нагревателей непрерывного действия:

$$P_{расч} = P_{номр} .$$

Для трёхфазных:

$$P_{расч} = P_{номр}$$

Конструктивные их параметры рассчитывают по среднему значению удельного электрического сопротивления ($\rho_{ср}$) материала:

$$\rho_{ср} = \frac{40 \rho_{20}}{t_{ср} + 20} ,$$

где

$$t_{ср} = \frac{t_1 + t_2}{2} .$$

7 Косвенный нагрев сопротивлением

Основным узлом ЭТУ, реализующим косвенный нагрев методом сопротивления, являются нагревательные элементы. Материал нагревательных элементов выбирают в зависимости от значения рабочей температуры ($t_{раб}$) и условий работы. Эти материалы, прежде всего, должны быть:

- жаростойкими;
- жаропрочными;
- технологичными.

Основные материалы, из которых изготавливаются нагревательные элементы ЭТУ – это, сталь и следующие сплавы:

- хромоникелевые (нихромы);
- хромалюминиевые (фехрали);
- хромоникельалюминиевые (нихром с алюминием).

Наиболее применяемые это нихромы: Х20Н80; Х15Н60; Х25Н20; Х23Н18 и т.д.

В ЭТУ с рабочими температурами $t_{раб} > 1250$ °С применяют неметаллические нагреватели из графита, тугоплавких металлов и т. д. Температурный коэффициент сопротивления нагревателей, изготовленных из обычной стали, большой, жаростойкость и жаропрочность невысокие, сопротивление зависит от значения протекающего по ним тока. Однако, они дешевле и недефицитны, поэтому их применяют для ЭТУ низкотемпературного нагрева (300... 400°С).

Нагревательные элементы по конструктивному исполнению разделяются на:

- открытые;
- закрытые;
- герметические.

7.1 Косвенный нагрев сопротивлением

- открытые электронагреватели изготавливают из металлических сплавов в виде ленты или проволоки, свёрнутых в спираль или зигзагообразно. Их крепят на керамических жаропрочных изоляторах в рабочем пространстве ЭТУ.

Теплота передаётся конвекцией и излучением. Чем выше температура нагрева, тем большая часть энергии инфракрасного излучения передаётся нагреваемому материалу.

- закрытый нагреватель находится в защищённой оболочке. Теплота передаётся в основном конвекцией.

- герметические нагреватели или ТЭН

Трубчатые электронагреватели (ТЭН) применяют для нагрева воды, воздуха, растворов электролитов и других сред. ТЭН можно размещать непосредственно в нагреваемой среде.

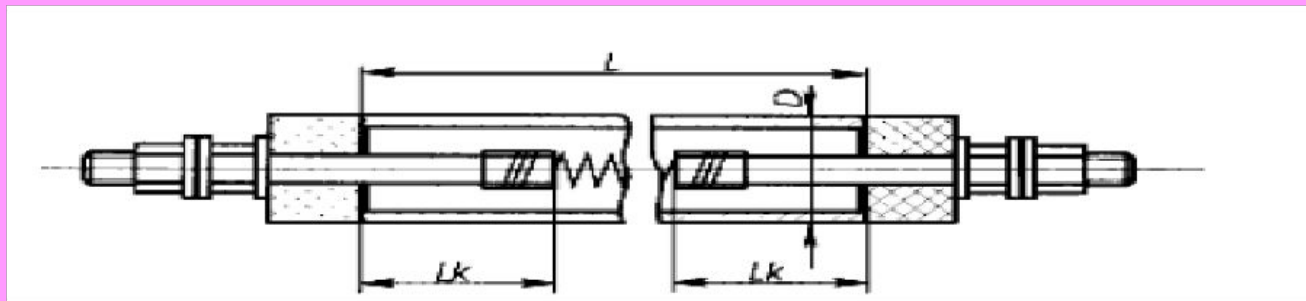


Рисунок 7.1 - Конструкция ТЭНа: D - диаметр оболочки; L - развернутая длина ТЭН; Lk - длина контактного стержня в заделке

В качестве материала оболочки обычно используют:

- медь;
- латунь;
- углеродистую и нержавеющей сталь.

7.2 Косвенный нагрев сопротивлением

Основным параметром, характеризующим ТЭН, является удельная поверхностная мощность $P_{уд}$, Вт/см²:

$$P_{уд} = \frac{P}{\pi \cdot D \cdot l_a}.$$

Предельное значение $P_{уд}$ ТЭНа определяется условиями работы, допустимыми температурами поверхности спирали, наполнителя и оболочки. Для определения числа нагревателей (необходимо помнить, что n – должно быть кратным трём):

$$n = \frac{P_{ЭТУ}}{P_1}.$$

где $P_{ЭТУ}$ – мощность установки, Вт; P_1 – мощность выбранного ТЭНа, Вт.

Цель электрического расчёта нагревателей – определение их размеров (сечение и длины).

Исходные данные для расчёта: напряжение питания $U_{пит}$; мощность одного нагревателя P_n ; условия работы нагревательных элементов, температурный режим.

Расчёт нагревателей основан на совместном решении, связывающих электрические и тепловые параметры нагревателей:

$$P_n = \frac{U_n^2}{R_n} = \frac{U_n^2 \cdot S}{\rho \cdot l},$$

7.3 Косвенный нагрев сопротивлением

а также уравнение теплообмена при теплопередаче:

- теплопроводностью

$$P_H = \lambda \cdot (t_2 - t_1) \cdot \frac{F_T}{l} = P_{y\partial m} \cdot F_T.$$

- конвекцией

$$P_H = \alpha_k \cdot (t_2 - t_1) \cdot F_k = P_{y\partial k} \cdot F_k.$$

- излучением

$$P_H = 5.7 c_{np} \cdot \left(\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right) \cdot F_u = P_{y\partial u} \cdot \alpha_1 \cdot F_u,$$

где α_1 – коэффициент эффективности излучения нагревателей; $P_{y\partial m}$; $P_{y\partial k}$; $P_{y\partial u}$ – удельные поверхностные мощности нагревателей при теплообмене теплопроводностью, конвекцией, излучением, Вт/см².

Удельная поверхностная мощность определяется:

$$P_{y\partial m} = \lambda \cdot (t_2 - t_1) / l$$

$$P_{y\partial k} = \alpha_k \cdot (t_2 - t_1)$$

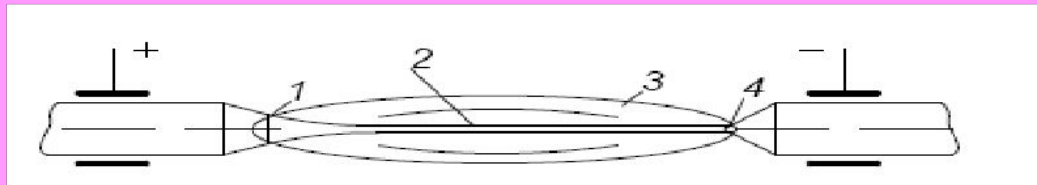
$$P_{y\partial u} = \omega_u \cdot \alpha_u$$

8 Электродуговой нагрев

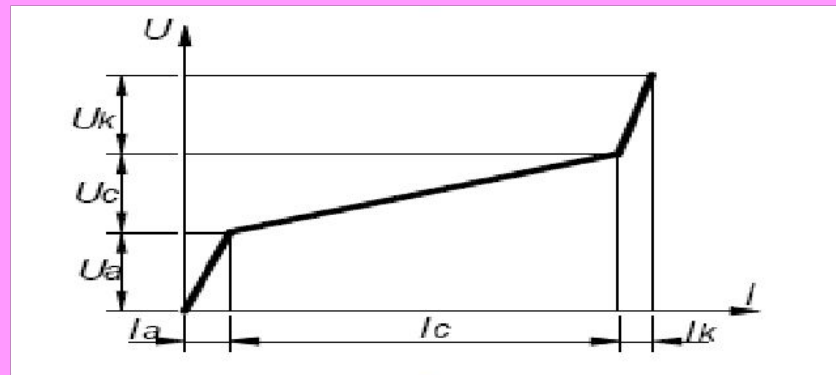
Дуговой разряд – это устойчивый самостоятельный электрический разряд в газах или парах металла, характеризующийся большой плотностью тока, низким падением напряжения на катоде и высокой температурой канала разряда.

Канал дуги по длине неоднороден и состоит из трёх последовательных участков:

- прикатодный;
- основной столб дуги;
- прианодный участок.



а



б

Рисунок 8.1 - Электрическая дуга (а) постоянного тока и распределение напряжения (б) на ее элементах: 1 – анодный кратер; 2 – столб дуги; 3 – светящаяся оболочка; 4 – катодное пятно.

8.1 Электродуговой нагрев

Длина прикатодного участка около 10^{-6} м, напряженность электрического поля равна $E_{\text{эл.поле}} = 10^7 \dots 10^8$ В/м, катодное падение напряжения $10 \dots 20$ В (в зависимости от рода тока, материала электрода, состояния газа). Температура прикатодного участка составляет $T_{\text{катода}} = 2500 \dots 2800$ К. Длина анодного участка более 10^{-6} м, анодное падение напряжения $U_a = 2 \dots 6$ В, а температура на участке достигает $T_{\text{анода}} = 2700 \dots 4500$ К.

В основном столбе дуги напряженность электрического поля $E = 1500 \dots 5000$ В/м, температура $T_{\text{столба}} = 6000 \dots 12000$ К, а концентрация ионов – 10^{24} 1/м³, т.е. можно заключить, что столб дуги представляет собой плазму с очень высокой плотностью.

Горение дуги сопровождается следующими эффектами:

- большим выделением теплоты на электродах. (на этом основана работа электродуговых печей прямого нагрева и техника электродуговой сварки);
- мощным лучистым потоком в оптическом диапазоне спектра электрических магнитных колебаний (это свойство используется в электродуговых печах косвенного нагрева и в газоразрядных источниках оптического излучения).

8.2 Электродуговой нагрев

Электрическая дуга, как потребитель электрической энергии, достаточно полно характеризуется статической вольтамперной характеристикой (ВАХ) $U_d = f(I_d)$, которую можно разбить на область малых токов (до 80...100А); средних токов (100...800А); высоких токов (больше 800А).

В I области ВАХ имеет падающий вид. Это объясняется тем, что с увеличением тока дуги I_d площадь поперечного сечения и удельное электрическое сопротивление дуги ρ_d увеличивается быстрее, чем ток. При этом плотность тока j и напряжённость электрического поля E уменьшаются.

Во II области напряжение на дуге практически не зависит от силы тока, т.к. площадь поперечного сечения столба увеличивается пропорционально току.

В III области при больших токах возрастание силы тока не сопровождается пропорциональным ростом катодного пятна. ВАХ дуги получается возрастающей.

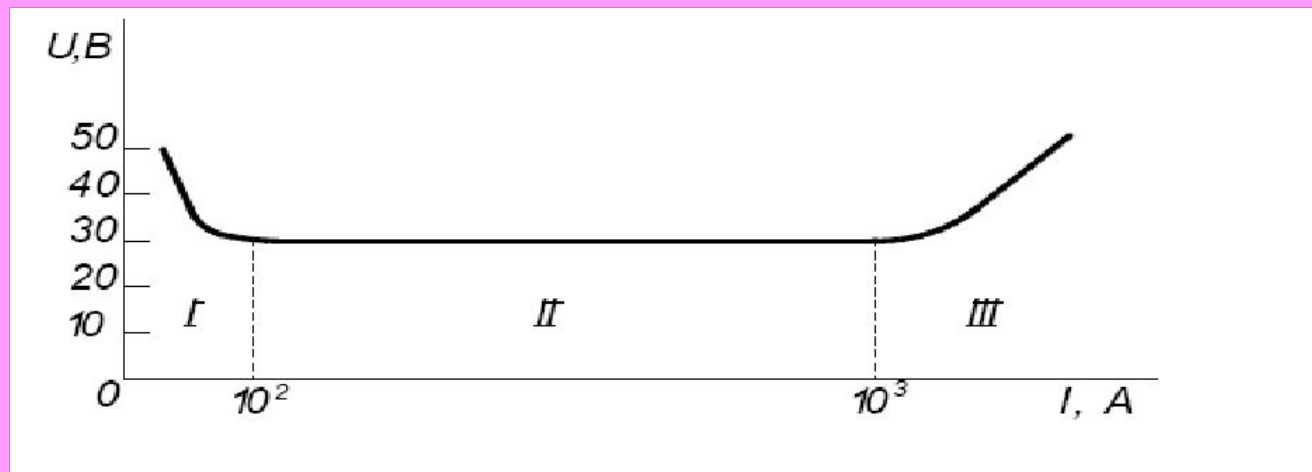


Рисунок 8.2 - Статическая вольт - амперная характеристика дуги постоянного тока.

8.3 Электродуговой нагрев

Связь общего падения напряжения на дуге с падением напряжения на отдельных ее элементах в области малых токов устанавливает формула Г. Айртона:

$$U_{\partial} = \alpha + \beta \cdot l + (\gamma + \delta \cdot l) / I_{\partial}$$

где α - суммарное анодно-катодное падение напряжения, В; β - градиент потенциала в столбе дуги, В/м; l — длина дуги, м; γ и δ - мощности, затрачиваемые на вырывание электронов из катодного пятна, Вт/А, и на продвижение электронов в межэлектродном промежутке на единицу расстояния, Вт/(А·м); I_{∂} - сила тока дуги, А.

Падение напряжения $(\gamma + \delta l) / I_{\partial}$ зависит от силы тока, что соответствует падающему характеру ВАХ. Для средних токов это слагаемое мало:

$$U_A = \alpha + \beta \cdot l$$

Среда, в которой дуга горит, влияет на форму статической ВАХ. Так, в среде инертных газов даже при небольших токах характеристика дуги возрастающая. Ее применяют при сварке в среде защитных газов, плазменно-дуговых процессах.

Рассмотренные явления происходят в электрической дуге постоянного и переменного тока. Статическая ВАХ на переменном токе соответствует действующим значениям тока и напряжения. При этом катодная и анодная области дуги меняются местами в зависимости от полярности приложенного напряжения.

8.4 Электродуговой нагрев

В сварочной технике электрическую дугу классифицируют по роду среды, в которой происходит разряд:

- открытая дуга, горящая в воздухе, парах металла;
- закрытая дуга, горящая под флюсом в парах металла и флюса;
- защищённая дуга, горящая в защитных газах (аргон, гелий, двуокись углерода), ВАХ открытой дуги имеет падающий вид, а закрытой и защищённой – возрастающий.

Источники питания выбирают по следующим параметрам:

- роду тока;
- напряжению холостого хода;
- внешней характеристике;
- способам регулирования сварочного тока.

Электрическая дуга может быть как на постоянном, так и на переменном напряжении. Устойчивость дуги переменного тока снижается из-за угасания её при каждом переходе тока через ноль. Поэтому горение дуги является прерывистым и неустойчивым. Статические ВАХ на переменном и постоянном токе подобны. Напряжение зажигания дуги постоянного тока составляет 30...40В; а переменного – 50...55В. Напряжение холостого хода источника должно быть больше напряжения зажигания на 10...50В.

8.5 Электродуговой нагрев

Источники питания сварочной дуги подразделяют по следующим основным признакам:

- роду сварочного тока – на источники переменного (сварочные трансформаторы) и постоянного (преобразователи, агрегаты, выпрямители) тока;
- числу одновременно подключаемых сварочных постов – на одно- и многопостовые;
- способу установки – на стационарные и передвижные.

В трансформаторах типов ТС, ТСК и ТД с подвижными катушками первичная и вторичная обмотки расположены вдоль стержня магнитопровода на некотором расстоянии одна от другой. Магнитное рассеяние регулируют, изменяя расстояние между обмотками.

В сварочных трансформаторах типа СТШ катушки первичной W_1 и вторичной W_2 обмоток расположены на разных стержнях магнитопровода. Между обмотками в окне магнитопровода установлен магнитный шунт, перемещением которого на пути потоков рассеяния изменяют индуктивное сопротивление, внешнюю характеристику и сварочный ток.

В трансформаторах типа ТСД с нормальным рассеянием обмотки размещают на стержневом магнитопроводе таким образом, чтобы потоки рассеяния были минимальными. Для получения необходимой индуктивности в цепь дуги последовательно со вторичной обмоткой включают дополнительную реактивную катушку W_p . В зависимости от ее конструктивного выполнения различают трансформаторы с отдельной и совмещенной катушкой.

Для питания дуги постоянного тока используют преобразователи, агрегаты и выпрямители.

9 Индукционный нагрев

Индукционный нагрев металлов основан на двух законах физики: законе электромагнитной индукции Фарадея – Максвелла и законе Джоуля – Ленца. Металлические тела помещают в переменное магнитное поле, которое возбуждает в них вихревое электрическое поле. ЭДС индукции определяется скоростью изменения магнитного потока, а сама зависимость представляет собой интегральную форму закона электромагнитной индукции:

$$e = -\frac{\partial \Phi}{\partial \tau}$$

Под действием ЭДС индукции в телах протекают вихревые токи, выделяющие теплоту по закону Ленца - Джоуля.

Электромагнитная волна несет энергию, определяемую вектором плотности потока мощности или вектором Пойнтинга. В комплексной форме вектор Пойнтинга:

где \dot{E} - комплекс амплитуды напряженности электрического поля, H^* сопряженный комплекс амплитуды магнитного поля.

9.1 Индукционный нагрев

При проникновении в проводящую среду электромагнитная волна ослабляется по экспоненциальному закону:

$$E = E_0 \cdot e^{-\frac{z}{z_0}},$$
$$H = H_0 \cdot e^{-\frac{z}{z_0}},$$

где E и H - амплитуды напряженности электрического и магнитного полей в глубине проводящего материала; E_0 и H_0 - амплитуды напряженности электрического и магнитного полей на поверхности проводящего материала; z - расстояние от поверхности проводника, м; z_0 - эквивалентная глубина проникновения электромагнитного поля, м.

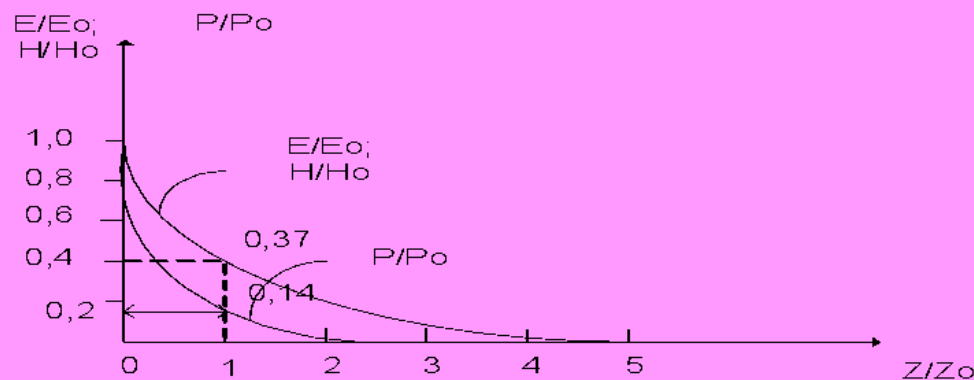


Рисунок 9.1 - График распространения электромагнитного поля в проводящей среде

9.2 Индукционный нагрев

На расстоянии z_0 от поверхности амплитуды E и H уменьшаются до следующих значений:

$$E = E_0 \cdot e^{-1} = 0,37 \cdot E_0 .$$

$$H = H_0 \cdot e^{-1} = 0,37 \cdot H_0 .$$

то есть амплитуда волны и 1091 уменьшается в $e = 2.718$ раза, или затухает до 37% своего начального значения.

Плотность S потока мощности, переносимая плоской электромагнитной волной, убывает по мере проникновения волны вглубь нагреваемого материала по закону:

$$S = S_0 \cdot e^{-\frac{2 \cdot z}{\delta_0}}$$

где S_0 - плотность потока мощности на поверхности проводника.

Причиной затухания электромагнитной волны является превращение энергии электромагнитного поля в теплоту по закону Ленца-Джоуля, вследствие чего и происходит индукционный нагрев металла.

9.3 Индукционный нагрев

Плотность потока мощности на глубине z_0 уменьшается до значения:

$$S = S_0 \cdot e^{-2} = 0,14 \cdot S_0 .$$

то есть в слое толщиной z_0 поглощается и выделяется в виде теплоты 86% всей энергии, прошедшей через поверхностный слой проводника.

Действительная часть комплекса вектора плотности потока мощности \dot{S} определяет плотность потока активной мощности, выделяющейся в виде теплоты:

$$\operatorname{Re} S = P = 2 \cdot 10^{-3} \cdot (I \cdot w)^2 \cdot \sqrt{\rho \cdot \mu_r \cdot f} \cdot k_p ,$$

где I - сила тока в индукторе, А; w - число витков, приходящееся на 1 м длины индуктора; ρ и μ_r - удельное электрическое сопротивление, Ом·м, и относительная магнитная проницаемость металла; f - частота тока, Гц;

- коэффициент поглощения мощности.

Мнимая часть комплекса является плотностью потока реактивной мощности, характеризующей скорость превращения энергии электромагнитного поля из электрической формы в магнитную и обратно:

$$\operatorname{Im} S = Q = 2 \cdot 10^{-3} \cdot (I \cdot w)^2 \cdot \sqrt{\rho \cdot \mu_r \cdot f} \cdot k_Q .$$

Потоки мощности Потоки мощности через боковую поверхность металлического цилиндра диаметром D_M , высотой 1м и периметром $\Pi = \pi \cdot D_M$ для активной мощности:

$$P_M = 2 \cdot 10^{-3} \cdot (I \cdot w)^2 \cdot \Pi \cdot \sqrt{\rho \cdot \mu_r \cdot f} \cdot K_p ,$$

для реактивной мощности

$$Q = 2 \cdot 10^{-3} \cdot (I \cdot w)^2 \cdot \Pi \cdot \sqrt{\rho \cdot \mu_r \cdot f} \cdot K_Q ,$$

где K_p и K_Q - коэффициенты активной и реактивной мощностей, учитывающие кривизну металлического цилиндра и зависящие от его относительного диаметра D/z_0 .

9.4 Индукционный нагрев

- индукционный нагрев, это нагрев токопроводящих тел в электромагнитном поле за счёт индуктирования в них вихревых токов. При этом электрическая энергия преобразуется **трижды**. Сначала при помощи индуктора она преобразуется в энергию переменного магнитного поля, которая в теле, помещённом в индуктор, превращается в энергию электрического поля. Затем под действием электрического поля его энергия превращается в тепловую. Передача энергии происходит бесконтактно. **Индукционный нагрев является прямым и бесконтактным**. Он позволяет достигать температуры, достаточной для плавления самых тугоплавких металлов и сплавов.
- В зависимости от используемых частот установки индукционного нагрева подразделяют на:
 - - низкочастотные (50Гц);
 - - среднечастотные (до 10 кГц);
 - - высокочастотные (свыше 10 кГц).
- Установки индукционного нагрева широко применяют на различных ремонтных предприятиях. Токи средней и высокой частоты используют для сквозного нагрева деталей перед горячей обработкой, при восстановлении их методами наплавки, металлизации и пайки, а также для поверхностной закалки деталей и других технологических операций. Основным элементом такого рода устройства является индуктор.
- Индукторы в зависимости от назначения и формы нагреваемого изделия бывают:
 - - цилиндрические; - овалыные; - щелевые; - стержневые;
 - - плоские; - петлевые.

9.5 Индукционный нагрев

Система индуктор – деталь представляет собой воздушный трансформатор, у которого первичной обмоткой является индуктор, а вторичной обмоткой и одновременно нагрузкой – нагреваемый металл. Напряжение на индукторе, В:

$$U_1 = I_1 \cdot \sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2} ,$$

где I_1 - ток в индукторе, А; R_1 и X_1 - активное и индуктивное сопротивление первичной цепи (индуктора), Ом; R_2' и X_2' - активное и индуктивное сопротивление вторичной цепи, Ом, приведенные к току индуктора.

Сопротивление R_2' и X_2' :

$$R_2' = R_2 \cdot W_2 ,$$

$$X_2' = X_2 \cdot W_2 ,$$

где R_2 и X_2 - активное и индуктивное сопротивления вторичной цепи, Ом; W_2 - число витков индуктора.

Мощность, передаваемая в деталь:

$$P_2 = I_1^2 \cdot R_2' .$$

Активное сопротивление, Ом, металлического цилиндра диаметром D_2 , м, и длиной l , м:

$$R_2 = \frac{\rho_2 \cdot \pi \cdot D_2}{l \cdot z_{o2}} ,$$

где ρ_2 - удельное электрическое сопротивление нагреваемого металла, Ом·м; D_2 - диаметр цилиндра, м; l - длина цилиндра, м; z_{o2} - эквивалентная глубина проникновения электромагнитного поля в нагреваемом металле, м.

9.6 Индукционный нагрев

Активное сопротивление, Ом; нагреваемого металла, приведенное к току индуктора в соответствии с формулой:

$$R'_2 = R_2 \cdot W = \frac{\rho_2 \cdot \pi \cdot D_2 \cdot W^2}{l \cdot z_{01}} .$$

Мощность, Вт, подаваемая на индуктор,

$$P = I_1^2 \cdot (R_1 + R'_2) .$$

Полагая, что витки индуктора намотаны без зазора, с некоторым приближением можно считать, что

$$R_1 = \frac{\rho_1 \cdot \pi \cdot D_1 \cdot W^2}{l \cdot z_{01}} ,$$

где ρ_1 - удельное электрическое сопротивление проводника индуктора, Ом·м; D_1 - диаметр индуктора, м; l - длина индуктора, м; z_{01} - эквивалентная глубина проникновения электрического тока в проводнике индуктора, м.

В инженерной практике для расчёта индукционных нагревателей применяют графоаналитические методы, основанные на экспериментальных исследованиях.

10. Диэлектрический нагрев

Диэлектрический нагрев используют для нагрева непроводящих материалов (диэлектриков), а также полупроводников и проводников II рода. Нагрев происходит в высокочастотном электрическом (электромагнитном) поле вследствие поляризации сред и протекания токов сквозной проводимости.

В диэлектриках процессы поляризации сопровождаются движением (смещением) связанных зарядов, которые есть не что иное, как ток электрического смещения. Плотность тока смещения определяется скоростью изменения вектора электрической индукции D .

$$\bar{J} = \frac{\partial \bar{D}}{\partial \tau} .$$

Диэлектрик, подлежащий нагреву, помещают между металлическими обкладками конденсатора, подключенного к источнику переменного тока. Мощность, Вт/м³, выделяемая в единице объема нагреваемого диэлектрика, определяется выражением, известным из курса ТОЭ при подстановке в которое $\varepsilon_0 = 1/4\pi \cdot (9 \cdot 10^9)$ Ф/м:

$$P_v = 5,55 \cdot 10^{-11} \cdot f \cdot E^2 \cdot \varepsilon_r \cdot \operatorname{tg} \delta .$$

Из уравнения следует, что диэлектрическая проницаемость ε_r и тангенс угла потерь $\operatorname{tg} \delta$ – основные характеристики диэлектрика, определяющие его нагрев в переменном электрическом поле. Они зависят от частоты f изменения электрического поля, его напряженности, температуры диэлектрика и некоторых других факторов.

В СВЧ - диапазоне наиболее часто используют электромагнитные колебания на частотах 433, 915, 2375 МГц.

10.1 Диэлектрический нагрев

При выборе напряженности электрического поля исходят из того, что для каждого нагреваемого материала существует определенная напряженность $E_{пр}$, при превышении которой происходит электрический пробой материала. Пробивная напряженность многих материалов составляет несколько киловольт на миллиметр.

При нагреве материала без воздушного зазора рабочая напряженность, В/м:

$$E = \frac{E_{пр}}{1,5...2} .$$

Минимальную частоту, обеспечивающую требуемый режим нагрева без воздушного зазора в рабочем конденсаторе, находят из выражения:

$$f_{min} = \frac{\rho \cdot c \cdot (t_2 - t_1)}{2\pi \cdot \eta_m \cdot \tau \cdot E^2 \cdot \varepsilon \cdot tg\delta} .$$

При нагреве материала с воздушным зазором в рабочем конденсаторе

$$f_{min} = \frac{\rho \cdot c \cdot (t_2 - t_1) \cdot \varepsilon_r}{2\pi \cdot \eta_m \cdot \tau \cdot E_3^2 \cdot \varepsilon_0 \cdot tg\delta} .$$

Увеличивая частоту поля, можно выделить в материале требуемую объемную плотность мощности при пониженной напряженности поля.

10.2 Диэлектрический нагрев

При проектировании и разработке емкостного нагревателя для непроводниковых материалов часто возникает необходимость расчета эквивалентных электрических параметров рабочего конденсатора.

Сопротивление воздушного зазора:

$$x_s = \frac{1}{\omega \cdot C_s} .$$

Сопротивление нагреваемого материала:

$$z_2 = r_2 - jx_2 = \frac{1}{j\omega \cdot C_2} ,$$

где ω - круговая частота тока; r_2 и x_2 - активное и емкостное сопротивления нагреваемого материала.

Существует утверждение: внешнее (краевое) поле конденсатора с нагрузкой подобно полю пустого конденсатора. Отсюда следует способ расчета:

$$C_0 = C - C_{\text{ср.ч}} ,$$

где C - емкость пустого конденсатора; $C_{\text{ср.ч}}$ - емкость средней части конденсатора, в которой помещается нагреваемый материал.

Так как поле средней части конденсатора близко к однородному, а к этому всегда стремятся, выбирая соответственно размеры электрода и зазоры, то, например, для плоского конденсатора:

$$C_{\text{ср.ч.}} = \frac{\varepsilon_0 S_2}{d_1} ,$$

где $\varepsilon_0 = (4\pi \cdot 9 \cdot 10^{11})^{-1}$ - диэлектрическая проницаемость вакуума, Ф/см; d_1 - расстояние между электродами; $S_2 = a_2 \cdot b_2$ - площадь поверхности диэлектрика, обращенной к электродам.

10.3 Диэлектрический нагрев

При индукционном нагреве принято различать источники питания и установки низкой (промышленной) 50 Гц, средней (повышенной) $(0,15...10) \cdot 10^3$ Гц и высокой $(0,15...100) \cdot 10^5$ Гц частот.

При диэлектрическом нагреве используют источники и установки высокой $(3...100) \cdot 10^6$ Гц и сверхвысокой $(0,3...220) \cdot 10^8$ Гц частот.

Для питания электротермических установок индукционного нагрева на высоких частотах (от 20...30 кГц) и установок диэлектрического нагрева используют ламповые генераторы с самовозбуждением.

Рабочая частота, Гц, генератора:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}},$$

где L - индуктивность катушки контура, Гц; C - емкость конденсатора контура, Ф.

Для генерации электромагнитного поля СВЧ используют: специальный генератор, в котором электрическая энергия постоянного тока преобразуется в энергию электромагнитного поля СВЧ. Магнетрон – основной СВЧ-генератор, применяемый в электротермии.

В общем виде генерируемая магнетроном частота f определяется числом резонаторов T и напряженностью магнитного поля H :

$$f = a \cdot N \cdot H .$$

Напряженность магнитного поля:

$$H = b \cdot \sqrt{U_a} ,$$

где b - постоянный коэффициент, зависящий от конструкции магнетрона; U_a - анодное напряжение.

11. Электронно-лучевой и лазерный нагрев

Электронно-лучевой нагрев выполняют лучом (пучком) электронов, эмитируемых нагретым катодом, в глубоком вакууме. Устройство, формирующее электронный луч для технологического использования, называют электронной пушкой. Электроны, эмитируемые нагретым катодом пушки, ускоряются и фокусируются электрическим полем. На электрон в электрическом поле действует сила $F=e \cdot E$, под действием которой он ускоряется и приобретает энергию:

$$W = \frac{m_e \cdot v^2}{2} = e \cdot U ,$$

где m_e , v и e - масса, скорость и заряд электрона; U - ускоряющее напряжение.

Разогнанный в электрическом поле поток электронов направляется на нагреваемый материал, при встрече с которым электроны тормозятся и их кинетическая энергия преобразуется в теплоту. Чтобы энергия электронов не рассеивалась на молекулах газа, электронный луч создают в вакууме при давлении $10^{-2} \dots 10^{-3}$ Па. В зависимости от технологического назначения электронно-лучевых установок ускоряющее напряжение U изменяется от 15...20 до 100...200 кВ. Наиболее распространены электронно-лучевые установки с напряжением равным 20...30 кВ.

11.1 Электронно-лучевой и лазерный нагрев

При напряжениях больше 20 кВ торможение электронов на металлической поверхности сопровождается не только нагревом, но и рентгеновским излучением (наподобие излучения рентгеновских трубок), что требует специальных мер защиты обслуживающего персонала.

Мощность выделяемая электронным пучком в месте встречи с материалом, $P = U \cdot I \cdot \eta$ (где I – сила тока пучка; η – КПД). Величина мощности может иметь значение от десятков до тысяч кВт в единице объема. Площадь же сечения луча на поверхности тела $10^{-3} \dots 10^{-5} \text{ мм}^2$.

Основные технологические особенности электронно-лучевого нагрева заключаются в следующем: высокая концентрация мощности; нагрев материалов в вакууме, обеспечивающий высокое качество сварки и других процессов (что особенно важно для химически активных материалов); возможность плавного регулирования мощности; малоразмерная зона воздействия луча на материал (что позволяет выполнять тонкие термические операции на микродеталях).

К недостаткам электронно-лучевого нагрева относят: необходимость использования высокого вакуума; повышенная опасность при обслуживании из-за рентгеновского излучения; высокая стоимость и сложность эксплуатации оборудования.

11.2 Электронно-лучевой и лазерный нагрев

Лазеры или оптические квантовые генераторы – источники оптического излучения, отличающегося высокой когерентностью, узкой направленностью, большой концентрацией мощности, высокой степенью монохроматичности, способностью к фокусированию.

Лазерное излучение является индуцированным. Его испускают возбужденные внешним источником энергии (системой накачки) атомы или молекулы оптически активных веществ, электроны которых при возбуждении переходят на более высокие энергетические уровни, а затем, возвращаясь в первоначальное состояние, отдают приобретенную энергию в виде лавины квантов, тождественных по направлению, частоте, фазе и поляризации фотонам возбуждающей энергии.

Энергия перехода электрона с верхнего на нижний энергетический уровень определяется законом Планка:

$$\Delta E = E_2 - E_1 = h \cdot \nu,$$

где $E_2 - E_1$ – энергия уровней, между которыми происходит переход; $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с - постоянная Планка; ν - частота переходов, c^{-1} .

Энергия излучения, которую имеет единица объема активного вещества концентрацией частиц N_0 , m^{-3} , зависит от степени инверсии активного вещества - количества N возбужденных атомов, электроны которых могут находиться на верхнем энергетическом уровне. Инверсное состояние можно описать формулой, определяющей распределение атомов по энергетическим уровням:

$$N = N_0 \cdot e^{(-E/k \cdot T)},$$

где E - энергия верхнего уровня; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж·К⁻¹ - постоянная Больцмана.

11.3 Электронно-лучевой и лазерный нагрев

Если считать температуру T вещества отрицательной, ибо с понижением температуры генерация возникает при меньшей энергии накачки. Инверсное состояние называют также "состоянием с отрицательной температурой". Энергия излучения, которую потенциально имеет единица объема активного вещества, Дж·м⁻³:

$$W = \Delta E \cdot N.$$

Особенности лазерного нагрева: наивысшая плотность мощности, известная на Земле, возможность передавать энергию лазера на расстояние и осуществлять, таким образом, бесконтактный нагрев тел; плавность регулирования интенсивности лазерного излучения и др.

Технологические особенности и свойства лазерного нагрева во многом совпадают со свойствами электронно-лучевого нагрева, схожи и области их применения. Однако лазерный нагрев имеет свои преимущества: он осуществляется на воздухе и не сопровождается рентгеновским излучением, стоимость установок лазерного нагрева меньше и они проще в обслуживании. Механизм воздействия лазерного излучения в зависимости от параметров может быть тепловым и химическим, связанным с разрывом старых и установлением новых химических связей, так как кванты энергии оптического диапазона, соизмеримы с энергией некоторых химических связей в молекулах вещества. Это свойство лазерных лучей особенно важно при использовании в селекционной работе для индуцированного мутагенеза семян с целью получения растений с комплексом хозяйственно ценных свойств, в процессе предпосевной обработки семян, дефектоскопии и прединкубационной обработки яиц, в ветеринарии.

11.4 Электронно-лучевой и лазерный нагрев

- Лазер состоит из трех основных узлов: излучателя (рабочее тело), системы накачки, оптического резонатора.
- Излучатель - оптически активное вещество (тело), предназначенное для преобразования энергии накачки в лазерное излучение. Активное вещество может быть твердым диэлектриком, полупроводником, жидкостью, газом. Соответственно различают твердотельные, полупроводниковые, жидкостные и газовые лазеры. Наиболее распространены твердотельные и газовые лазеры.
- Система накачки предназначена для возбуждения атомов активных веществ. Накачка может выполняться электрическими разрядами (газовые лазеры), оптическим излучением с помощью специальных ламп (твердотельные и жидкостные лазеры) и другим путем.
- Оптический резонатор включает систему отражательных, преломляющих, фокусирующих и других оптических элементов, служащих для взаимодействия излучения с рабочим веществом.
- Для технологических целей используют газовые лазеры на аргоне, ксеноне, углекислом газе и твердотельные лазеры на неодимовых стеклах. Наибольшую мощность (до 5 кВт, а опытные образцы - до 20 кВт) имеют лазеры на углекислом газе с примесью азота и гелия (CO_2 -лазеры).
- Лазеры работают в непрерывном и импульсном режимах. Первый характеризуется мощностью луча, второй - мощностью, длительностью, энергией импульса и частотой их повторения. CO_2 -лазер в непрерывном режиме имеет мощность $10 \dots 10^2$ Вт, в импульсном – $10^6 \dots 10^9$ Вт, длительность импульсов $1 \dots 10$ мкс, частота $25 \dots 100$ Гц, КПД $8 \dots 30$ %. Наиболее высоким КПД ($50 \dots 60$ %) отличаются полупроводниковые лазеры, работающие преимущественно в импульсном режиме.

11.5 Электронно-лучевой и лазерный нагрев

- Ионный нагрев металлических тел осуществляют потоком положительных ионов низкотемпературной плазмы, создаваемой в вакууме тлеющим электрическим разрядом.
- Нагреваемое тело помещают в металлическую вакуумированную (давление порядка 10^{-3} Па) камеру и подводят к нему отрицательный полюс источника питания постоянного тока, а к стенкам камеры - положительный полюс. В камеру подают рабочие летучие вещества: газ (аммиак, бор и др.), твердые летучие вещества, пары металлов (их получают в той же камере электродуговым испарением). Между изделием и стенками камеры возбуждают тлеющий электрический разряд. Катод - изделие нагревается потоком положительных ионов летучих присадочных веществ, извлекаемых из низкотемпературной плазмы. Ионы, устремляющиеся к изделию, не только нагревают его, отдавая запасенную в электрическом поле энергию, но и вступают с поверхностью изделия в сложные взаимодействия, поэтому ионный нагрев используют в процессах химико-термической обработки металлов:
 - – диффузное поверхностное упрочнение (азотирование, цементация, борирование и др.) металлических изделий (инструмента, шестерен, гильз двигателей внутреннего сгорания, коленчатых валов и др.) путем насыщения легирующими элементами слоев изделий при диффузном взаимодействии ионов с изделием, сопровождаемым нагревом. Процесс протекает при скорости диффузии ионов в металл, превышающей скорость осаждения ионов;
 - – поверхностное покрытие изделий путем ионно-плазменного напыления нитридов (молибдена, титана и др.), карбидов, карбонитридов и других веществ. Процесс протекает при скорости конденсации ионов, превышающей скорость их диффузного взаимодействия с подложкой.

11.6 Электронно-лучевой и лазерный нагрев

Установки электронно-лучевого, лазерного и ионного нагрева питаются от источников постоянного тока (напряжения). Общий элемент источников питания (ИП) - преобразователь переменного тока в постоянный. Различаются установки мощностью и выходным напряжением (десятки и сотни вольт в установках ионного нагрева, единицы киловольт в установках лазерного нагрева, десятки киловольт в установках электронно-лучевого нагрева).

Основные требования к источникам питания: возможность регулирования мощности; устойчивость к коммутационным перенапряжениям; обеспечение управления по заданному режиму или программе.

Структурная схема ИП включает в общем случае следующие блоки: преобразования напряжения сети в необходимое напряжение установки (повышающий трансформатор);

преобразования переменного тока в постоянный (неуправляемый или управляемый выпрямитель, фильтры, устройства стабилизации и защиты);

собственных нужд (системы накачки, поджига, фокусирования и др.); управления, регулирования, контроля.

При общих принципах структуры источники питания установок каждого вида имеют особенности, обусловленные видом вольтамперных характеристик, спецификой работы, технологическими и другими требованиями.

12. Электрические водонагреватели и паровые котлы

Электрические водонагреватели и парогенераторы применяют в системах горячего водоснабжения, отопления и вентиляции, в технологических процессах животноводства и растениеводства, в ремонтном производстве.

По сравнению с топливными установками электрические водонагреватели и парогенераторы позволяют снизить единичную мощность, повысить коэффициент использования и уровень автоматизации теплогенераторов, более точно поддерживать температуру и получить больший технологический эффект, снизить затраты на обслуживание, уменьшить длину тепловых сетей.

Аккумуляционные водонагреватели предназначены для нагрева и сохранения горячей воды в течение длительного времени. Водонагреватель представляет собой металлический теплоизолированный резервуар цилиндрической формы, внутри которого установлены трубчатые электронагреватели.

Аккумуляционные водонагреватели САОС и САЗС (С – способ нагрева сопротивлением, А – аккумуляторный, ОС ЗС, - открытая или закрытая система водоразбора) устроены одинаково и предназначены для работы в системах водоснабжения с избыточным давлением до 0,4 МПа.

Водонагреватели ЭВ-150М и САОС аналогичны по устройству и различаются размерами бака-аккумулятора.

Проточные водонагреватели не имеют резервуара для хранения горячей воды и теплоизоляции корпуса, более компактные и быстрodeйствующие, чем аккумуляторные. Например, элементные ЭВ-Ф- 15 и индукционные 084. ПВ – 1 проточные водонагреватели.

12.1 Электрические водонагреватели и паровые котлы

Электродные водонагреватели и парогенераторы относят к установкам прямого электронагрева сопротивлением. Водонагреватели выпускают на номинальное напряжение 0,4; 6 и 10 кВ и максимальное рабочее давление 0,6 МПа для низковольтных и 1...1,5 МПа для высоковольтных аппаратов.

Электродные водонагреватели предназначены для нагрева проточной воды в замкнутых системах теплоснабжения с избыточным давлением до 0,6 МПа. Они представляют собой цилиндрический сосуд, внутри которого расположены электроды для подвода тока к воде и электроды или диэлектрические вставки для регулирования мощности.

Электродный проточный водонагреватель ЭПЗ имеет два исполнения, различающихся приводом механизма регулирования мощности (И2 – ручной привод, И3 – электродвигательный привод).

Эквивалентная электрическая схема замещения водонагрева - треугольник. Мощность водонагревателя регулируют изменением площади активной поверхности регулирующих электродов (от 25 до 100%).

Электродный водогрейный котел КЭВ на номинальное напряжение 0,4 кВ выпускают в двух исполнениях: с цилиндрическими электродами для воды, имеющей удельное сопротивление при 20°C ниже 10 Ом·м, и с пластинчатыми – для воды, удельное сопротивление которой выше 10 Ом·м. Число электродов зависит от мощности котла и равно $3n + 1$, где n – целое число. Эквивалентная схема замещения водонагревателя - треугольник. Мощность регулируют изменением активной высоты электродов.

Высоковольтные котлы КЭВ на напряжение 6 и 10 кВ, мощностью 2500, 6000 и 10000 кВт с максимальной температурой воды 130 и 150°C конструктивно аналогичны низковольтным котлам этого типа. Цилиндрическая электродная система состоит из трех, шести или более однофазных групп, образованных коаксиально расположенными фазными и нулевыми электродами, между которой соосно установлена подвижная труба из диэлектрика для регулирования мощности.

12.2 Электрические водонагреватели и паровые котлы

Водонагреватели и парогенераторы выбирают по технологическому значению и расчетной мощности. При этом учитывают график потребления энергии и возможность аккумуляции горячей воды, если это необходимо.

Мощность поточного водонагревателя или парогенератора

$$P = Q_{max} / (3600 \cdot \eta_v),$$

где Q_{max} – максимальная часовая потребность в теплоте, Дж/ч; η_v - КПД электроводонагревателя и системы раздачи горячей воды и пара.

Мощность аккумуляторного водонагревателя или электрокотельной, работающей с аккумуляцией теплоты,

$$P = K_s \cdot Q_c / (\tau \cdot \eta_v),$$

K_s – коэффициент запаса, учитывающий возможность расширения теплопотребления, равный 1,2...1,25; τ - продолжительность работы водонагревателя или электрокотельной в течение суток, с.

Требуемую температуру $t_{см}$ воды достигают смешиванием горячей воды из водонагревателя с холодной. Расход горячей G_g и смешанной $G_{см}$ воды связан отношением

$$G_g = G_{см}(t_{см} - t_x) / (t_g - t_x).$$

По расчетной мощности выбирают требуемое число водонагревателей или парогенераторов.

13 Термоэлектрический способ

В основе термоэлектрического метода лежат термоэлектрические явления. Под термоэлектрическими явлениями понимают три термоэлектрических эффекта – Зеебека, Пельтье и Томсона, связанные с процессом переноса теплоты между местами контакта (спаями) в проводниках и полупроводниках.

Эффект Зеебека заключается в следующем: если составить электрическую цепь (термоэлемент) из двух разнородных проводников и места контактов поддерживать при разных температурах, то на свободных концах появится термоэлектродвижущая сила или термоЭДС.

ТермоЭДС, мкВ, может быть определена как:

$$E = e \cdot (T_2 - T_1) ,$$

где e – коэффициент Зеебека, мкВ/К; T_2 и T_1 – температуры горячего и холодного спаев, К.

Явление Зеебека обусловлено тем, что средняя энергия электронов, участвующих в переносе тока, во всех проводниках зависит от температуры, но в несходных материалах по-разному. Электроны в нагретом спае приобретают высокие скорости и устремляются на холодный спай, на котором накапливается отрицательный заряд. Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока возникающая таким образом термоЭДС не уравновесит термодиффузию электронов.

Эффект Пельтье представляет собой явление, обратное явлению Зеебека. Если через электрическую цепь, составленную из разнородных материалов, пропустить ток, то в зависимости от его направления в дополнение к теплоте Ленца – Джоуля на одном из контактов выделяется теплота, а на другом – она поглощается, т.е. происходит охлаждение.

13.1 Термоэлектрический способ

Теплота Пельтье, Дж, определяется выражением:

$$Q_n = \frac{K_n}{\tau} \cdot I ,$$

где K_n - коэффициент Пельтье, В/с; I - сила тока в цепи термоэлемента, А; τ – время протекания тока, с.

Эффект Томсона состоит в том, что при прохождении электрического тока по однородному проводнику, в котором существует перепад температур, к теплоте Ленца-Джоуля дополнительно выделяется или из нее поглощается некоторое количество теплоты (теплота Томсона), Дж.

$$Q_{том} = k_n \cdot I \cdot (T_2 - T_1) \cdot \tau ,$$

где K_T - коэффициент Томсона, В/(с·К); T_2 и T_1 - температура в различных участках проводника, К.

В основе работы термоэлектрических устройств нагрева и охлаждения лежит использование эффекта Пельтье.

Работа теплового насоса заключается в перекачке тепловой энергии от материала с более низкой температурой к материалу с более высокой температурой.

Распространенные компрессионные и абсорбционные агрегаты имеют значительную массу, большие габаритные размеры и потребляют много электроэнергии. Этим недостатком лишены термоэлектрические тепловые насосы.

13.2 Термоэлектрический способ

Если температура охлаждаемого спаеа T_1 , а нагреваемого T_2 , то теплоту Пельтье для горячего и холодного спаев можно выразить как:

$$Q_{1n} = e \cdot T_1 \cdot I .$$

$$Q_{2n} = e \cdot T_2 \cdot I .$$

Холодному спаю от окружающей среды сообщается теплота Q_0 . Кроме того, по ветвям термоэлемента вследствие их теплопроводности от горячего спаеа к холодному передается теплота Q_T . С некоторым приближением можно считать, что на каждом из спаев выделяется половина теплоты Ленца-Джоуля Q_R . Уравнение теплового баланса для холодного спаеа может быть записано в следующем виде:

$$Q_0 + Q_T + 0,5 \cdot Q_R = Q_{1n} .$$

Теплота, забираемая от окружающей среды:

$$Q_0 = Q_{1n} - Q_T - 0,5 \cdot Q_R .$$

Уравнение теплового баланса для горячего спаеа запишется так:

$$Q_{2n} + 0,5 \cdot Q_R = Q_T + Q_r ,$$

где Q_r - теплота, передаваемая горячим спаем нагреваемому объекту.

Из уравнения получаем:

$$Q_r = Q_{2n} + 0,5 \cdot Q_R - Q_T .$$

13.3 Термоэлектрический способ

Так как Q_r и Q_o представляют собой количество теплоты в единицу времени, то потребляемая мощность:

$$P = Q_r - Q_o .$$

Данное уравнение можно переписать в следующем виде:

$$P = e \cdot I \cdot (T_2 - T_1) + I^2 \cdot R ,$$

где R - сопротивление ветви термоэлемента, Ом.

Следовательно, эффективность отопления будет тем выше, чем меньше разность температур $T_2 - T_1$ между спаями.

Наиболее экономичным является режим работы теплового насоса, при котором отопительный или холодильный коэффициенты максимальны.

Термоэлектрические тепловые насосы перспективно применять в качестве кондиционеров.

Легкий переход с охлаждения на нагрев и, следовательно, большая гибкость по сравнению с обычными системами дают значительные преимущества термоэлектрическим кондиционерам.

14 Электрообогрев почвы и воздуха

- Для обогрева почвы и воздуха в парниках и теплицах, для обогрева пола, для прогрева водопроводов на вводе в помещения, водостоков, карнизов и др., применяют специальные электронагревательные провода и кабели. К ним относятся нагревательные провода ПОСХП, ПОСХВ, ПНВСВ, ПОСХВТ и кабели КНРПВ, КНРПЭВ, КНМСС, КМЖ, КМНС и др.
- Токпроводящая жила нагревательных проводов изготовлена изоцинкованной малоуглеродистой стали диаметром 1,1 мм (ПОСХП, ПОСХВ), 1,2 мм (ПНВСВ) и 1,4 мм (ПОСХВТ). В качестве электроизоляции используют поливинилхлорид (ПОСХВ, ПОСХВТ) и полиэтилен (ПОСХП). Максимальная рабочая температура нагрева проводов типа ПОСХП составляет 70°C, ПНВСВ - 80°C, ПОСХВ - 70°C, ПОСХВТ - 105°C. При этом электрическое сопротивление проводов ПОСХП и ПОСХВ составляет 0,174 Ом/м, ПОСХВТ - 0,120 Ом/м и ПНВСВ - 0,121 Ом/м, а удельная погонная мощность не должна превышать при обогреве полов и почвы 11 Вт/м для проводов ПОСХП и ПОСХВ и 16 Вт/м – для ПОСХВТ и ПНВСВ. В проводе ПНВСВ имеется дополнительная изоляция из фторопластовой ленты, экран из стальных проволочек диаметром 0,3 мм и наружная поливинилхлоридная оболочка, что увеличивает его срок службы в 4...5 раз и безопасность в эксплуатации.

14.1 Электрообогрев почвы и воздуха

- широко применяют для локального обогрева съемные электрообогревательные плиты, панели, коврики, грелки, манежи и другие устройства. В них используют нагревательные провода, кабели, угольнографитовые шнуры и ленты, а также резистивные композиционные материалы.
- В последнее время разработаны и изготавливаются новые типы нагревателей. К ним относятся нагревательные провода типов: ПНСФсЭФ, ПННФсЭФ, ПНМФсЭФ с удельной мощностью 30 Вт/м и максимальной температурой жилы 200°C; ПНСВ, ПНСП, ПНСФЭВ, ПНМФЭМ, ПНМФЭВ с удельной мощностью 20...50 Вт/м и максимальной рабочей температурой 80°C...200°C и др.
- Для изготовления нагревательных секций систем электрического обогрева строительных конструкций зданий и жилых помещений предназначены нагревательные кабели марок КНМПЭВ, КННПЭВ, КННмПЭВ, КННсПЭВ, с рабочей температурой ниже 80°C; нагревательные кабели КНЛЛЭВ, КНЛсПЭВ, КНФНФЭ с удельной мощностью 20...40 Вт/м и др.
- Нагревательные кабели типа КМЖ, КМНС, КНРПВ, КНРПЭВ имеют 1...4 нагревательные жилы из стальной оцинкованной проволоки или сплавов с повышенным сопротивлением, допустимая температура нагрева жилы 250°C, линейное сопротивление 0,11 Ом/м, удельная мощность до 109 Вт/м, напряжение 220 В.

14.2 Электрообогрев почвы и воздуха

- Гибкие ленточные нагреватели (плоские кабели) марок ЭНГЛ-80, ЭНГЛ-190 допускают температуру соответственно 85 и 180°C, имеют по
- восемь нагревательных жил, расположенных в одной плоскости в изолирующей стекловолоконной ленте. Лента с жилами заключена в пластиковую оболочку. Жилы могут соединяться параллельно, последовательно и т.д. Линейная мощность 40...100 Вт/м, линейное сопротивление 0,5...1,0 Ом/м. Там, где требуется высокая интенсивность нагрева, используют теплостойкие ленточные нагреватели типа НТЛ, допускающие температуру 400...600°C и линейную нагрузку 150...360 Вт/м, напряжение до 380 В.
- Выпускаются также гибкие ленточные нагреватели типа ЭНГЛ-1, ЭНГЛ - 2, ЭНГЛУ- 400, ЭНГКЕх мощностью 0,16...5,0 кВт и температурой нагрева ленты 23...400°C.
- В настоящее время начинают широко внедряться в электронагревательных установках саморегулирующиеся кабели. Это сравнительно новое направление в области нагревательных кабелей. Их производство стало возможным в связи с разработкой пластмасс и резистивных композиционных материалов, обладающих электропроводящими свойствами, изменяющимися в зависимости от их температуры.

14.3 Электрообогрев почвы и воздуха

Расчет нагревательных проводов и кабелей сводится к определению длины одного нагревательного элемента и их количества, приходящихся на одну фазу и в целом на нагревательную установку, которая бы обеспечила необходимую тепловую мощность $P_{расч}$, при принятом напряжении питания U , для выбранных проводов или кабелей с удельным сопротивлением R_l , Ом/м; и допустимой удельной мощностью $\Delta P_{доп}$, Вт/м.

При этом должно соблюдаться условие $\Delta P_{раб} \leq \Delta P_{доп}$.

Расчётная мощность принимается: для однофазных нагревателей – $P_{расч} = P_y$, а для трехфазных нагревателей – $P_{расч} = P_y / 3$.

Расчет ведется для установившегося режима, т.е. $P_{тепл.} = P_{эл.}$, тогда соотношение между электрическими и геометрическими параметрами нагревателя представляет:

$$P_{расч} = U \cdot I = I^2 \cdot R = U^2 / R = I^2 \cdot \rho \cdot l / S,$$

где l – длина нагревателя, м; S – поперечное сечение токоведущей жилы, мм².

Так как в нагревательных проводах и кабелях используются в основном жилы круглого сечения, а их диаметр приводится в технических характеристиках, то определять надо только длину нагревательного провода или кабеля.

Из приведенного выражения видно, что геометрические параметры нагревателя можно определить по напряжению, току, сопротивлению и мощности.

15. Электроимпульсные технологии

Электроимпульсные технологические процессы характеризуются прерывистым подводом энергии с определенной длительностью, частотой и скважностью.

Технологические процессы, основанные на использовании импульсного воздействия, в том числе высоковольтных разрядов в различных средах, применяют для обработки сельскохозяйственного сырья и материалов, управления поведением животных, при электрофизической обработке металлов, разрушении, дроблении и измельчении.

Методы генерирования силовых импульсов условно разделяют на непосредственные, путем инвертирования, формирования (изменения формы кривой) и суммирования или компенсации.

Системы генерирования импульсов делят на подключаемые параллельно нагрузке (релаксационные, электромашинные и др.), последовательно с ней (генераторы с прерывателями и ключами) и комбинированные.

Частоту следования импульсов можно определить:

$$f = \frac{1}{\tau_3} = \frac{1}{RC \ln[1/(1 - \alpha_3)]},$$

где τ_3 - время заряда;

$\alpha_3 = U_p / U_n$ - степень заряда конденсатора.

Для характеристики импульсов вводят понятие скважности:

$$S = T / \tau_{II}.$$

Средняя мощность, подводимая к разрядному контуру:

$$P = W / T = f W, [\text{Вт}]$$

Мощность генератора импульсов:

$$P = P_u / \eta_3, [\text{Вт}]$$

где η_3 - КПД зарядного контура.

15.1 Электроимпульсные технологии

Для ограждения летних лагерей и управления поведением животных применяют электрические изгороди (ЭИ). Электрическая изгородь включает в себя генератор импульсов и изгородь, в состав которой входят опорные стойки с изоляторами и токоведущая линия. Стойки располагают через 10...20 м, токоведущую линию выполняют из стальной оцинкованной проволоки диаметром 1,2...2 мм или токопроводящих шнуров на синтетической основе. Линия может быть одно- или многопроволочной, высота подвеса 30...90 см.

Для ЭИ обычно применяют RC- генераторы как наиболее простые и легкоуправляемые. Они могут быть с индуктивным и емкостным выходом.

Рекомендуемые параметры импульсов

Амплитудное значение напряжения на линии	2...10 кВ
Амплитудное значение тока в импульсе	50...150мА
Частота импульсов	60...120 мин ⁻¹
Количество электричества, протекающего через тело животного	2...2,5мКл
Длительность импульса, не более	0,1 с
Скважность импульсов, не менее	15

15.2 Электроимпульсные технологии

В электрогидравлических установках используется электрогидравлический эффект (ЭГЕ) – способ непосредственного преобразования электрической энергии в механическую, при котором вследствие электрического разряда в межэлектродном пространстве, заполненном жидкостью, выделяются значительные мощности. Процесс сопровождается ударными волнами, ультразвуковыми колебаниями, кавитационными явлениями, а также инфракрасным, ультрафиолетовым излучениями и ионизацией элементов жидкости.

Для получения ЭГЭ применяют релаксационные генераторы. Для резко неоднородных электрических полей, наиболее часто применяемых в установках ЭГЭ («стержень – плоскость»), максимальное расстояние между электродами, при котором ещё возможен пробой, м.

$$l_{max} = \left\{ \frac{U_0^2 \cdot C}{a \cdot b \cdot \nu} \left[\frac{U_1^2}{U_0^2} - 4 \cdot \frac{U_1}{U_0} + 3 + \ln \frac{U_1^2}{U_0^2} + \frac{4\pi A}{b^2} \right] \right\}^{1/2} - \frac{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot A}}{b},$$

где U_0 – напряжение, при котором напряженность электрического поля у вершины стержня принимает критическое значение, достаточное для возникновения ионизации жидкости, В; C – емкость накопительного конденсатора, Ф; $\alpha = 3,6 \cdot 10^5$ В²·с/м – постоянная; $b = 2 \cdot 10^4 \cdot U_I$ – коэффициент зависящий от напряжения, В; ν – удельная электрическая проводимость жидкости, См/м; U_I – напряжение заряженного накопительного конденсатора, В; A – площадь неизолированной поверхности стержня, м².

15.3 Электроимпульсные технологии

Периодический затухающий разряд конденсатора, необходимый для получения мощной ударной волны, создается при соотношении:

$$R < 2 \cdot \sqrt{L/C}.$$

Индуктивность L разрядной цепи обычно составляет $(0,4 \dots 10) \cdot 10^{-6}$ Гн. Её сопротивление R складывается из сопротивлений последовательно включенных элементов цепи, в том числе нелинейного сопротивления R_k канала, Ом. В момент, когда сила разрядного тока максимальна,

$$R_k = 4,4 \cdot 10^7 \cdot I_{\max}^{-1,5},$$

Максимальная сила тока, А,

$$I_{\max} \approx 0,5 \cdot U_2 \cdot \sqrt{C/L}.$$

Максимальная мощность, развиваемая в канале разряда, Вт,

$$P_{\max} = I_{\max}^2 \cdot R_k$$

Расстояние между электродами, соответствующее предельно возможной, называют оптимальным, м,

$$l_{opt} = 8 \cdot 10^9 \cdot U_2^{3/2} \cdot (C/L)^{1/4}$$

При расстоянии между электродами l_{opt} энергия, Дж, выделяющаяся в межэлектродном промежутке в течение первого полупериода $T_1 \approx 3,8 \cdot \sqrt{LC}$ колебаний разрядного тока,

$$W_1 = C \cdot U_2^2 / 2$$

На расстоянии $x \leq 2,5l$ от оси канала давление на фронте волны, Па,

$$p_{\phi} = 6,1 \cdot x^{-1/2} \cdot W^{5/8} \cdot T_1^{-3/4}$$

Если $x > 2,5l$, то давление уменьшается примерно на 30% по сравнению со значением соответствующим $x = 2,5l$. При $x > 5l$ оно падает пропорционально $(1/x)^{1,1}$.

Применение ЭГЭ перспективно в самых различных областях промышленности и сельского хозяйства для разрушения, дробления и измельчения материалов.

16. Тепловая обработка материалов

Тепловая обработка представляет собой технологический процесс, в результате которого под действием теплоты изменяются состояние, структура или физико-химические свойства материалов.

Конвективную сушку проводят в сушилках или сушильных электропечах, пропуская через слой плодов воздух, нагретый с помощью электрокалориферов до температуры 50...75 °С.

Наиболее распространены камерные и туннельные конвективные сушильные электропечи.

Камерная и туннельная электропечи рассчитаны на разовую загрузку одной тонны сырья и сушку в течение суток. Установленная мощность калорифера 42 кВт; при толщине слоя плодов 0,5 м подача вентилятора 4000 м³/ч. Расход электрической энергии 5,3...5,6 кВт·ч на получение 1 кг сухофруктов.

В основе расчета мощности электроподогревателей воздуха лежит материальный и тепловой баланс сушильной установки.

Из материального баланса сушки определяют массу испаряемой влаги, кг,

$$m_e = m \cdot (W_1 - W_2) / (100 - W_2),$$

Необходимая подача вентилятора, м³/с,

$$V_t = m_e \cdot 10^3 / [\rho(d_2 - d_1) \cdot \tau],$$

где ρ - плотность воздуха, кг/м³, при средней относительной влажности $\varphi = 0,5(\varphi_0 + \varphi_2)$, %; d_2 и d_1 - влагосодержание воздуха, выходящего из материала при сушке и входящего в него, г/кг.

16.1 Тепловая обработка материалов

Мощность калорифера, Вт,

$$P = V_t \cdot \rho \cdot (h_1 - h_0) / (\eta \cdot \eta_k),$$

где h_1 и h_0 – энтальпия воздуха соответственно после и до прохождения через калорифер, Дж/кг; $\eta = 0,8 \dots 0,9$ – коэффициент, учитывающий потери воздуха в сушилке; $\eta_k = 0,9 \dots 0,95$ – КПД электрокалорифера.

Значения d_1 , d_2 , h_0 и h_1 находят по диаграмме $h-d$.

Электротерморadiационные сушилки – это устройства, в которых теплота передается обрабатываемому материалу от источников инфракрасного излучения.

Значительное распространение получила терморadiационная сушка лакокрасочных покрытий, тканей, бумаги, электрической изоляции, зерна, риса, семян подсолнечника и овощей, гранулированных кормов и др.

Высокочастотные сушилки – это установка диэлектрического нагрева, в которых происходит объемный ввод энергии в материал. При быстром нагреве внутренних слоев материала создаются градиенты температуры и давления, направленные наружу, что способствует миграции влаги из глубины тела к поверхности и существенной интенсификации процесса сушки. По сравнению с конвективной скоростью высокочастотный (ВЧ) сушки выше в десятки – сотни раз. В отличие от других способов ВЧ – сушка обеспечивает равномерную усадку сушильного материала без образования трещин и поверхностной корки.

Для сушки зерна используют частоты 10...12 МГц. Мощность установки определяют, проводя тепловой расчет. Энергоемкость при ВЧ – сушке 1,8...3,5 кВт·ч на 1 кг испаренной влаги.

16.2 Тепловая обработка материалов

Тепловую обработку фуражного зерна используют для повышения его перевариваемости при подготовке к скармливанию животным – это пропаривание, экструдирование, микронизация, электрогидротермическая обработка и др.

При микронизации фуражное зерно влажностью 18...20 % в течение 50 с подвергают воздействию ИК-излучения с длиной волны 1000...5000 нм. Инфракрасные лучи проникают в зерно и вызывают его интенсивный нагрев до температуры 90...100 °С. Зерно разбухает, становится мягким и растрескивается; после плющения его скармливают животным. Микронизация повышает энергетическую ценность зерна на 10...30 %, частично его обеззараживает, уменьшает всхожесть семян сопутствующих сорных растений.

Установки ИК - нагрева предназначены также для пастеризации молока, уксуса, фруктовых, ягодных и овощных соков, других органических жидкостей, дезинсекции зерна, предпосевной обработки семян.

Лазерные установки используют при предпосевной обработке семян, в селекционной работе, для облучения яиц и др.

16.3 Тепловая обработка материалов

Эрозия при электрических разрядах в диэлектрических жидкостях протекает более интенсивно, чем при разрядах в газах, и может быть использована для обработки металлов.

Режимы работы электроэрозионных установок различаются длительностью. Обычно искродуговые разряды называют электроимпульсным режимом - электроэрозионная обработка (ЭЭО), а искровые - электроискровым режимом - электроимпульсная обработка (ЭИО).

При ЭЭО возможны технологические операции, не выполнимые другими способами, например получение отверстий сложной формы или малого диаметра (менее 0,3 мм).

Электронно-ионная технология (ЭИТ) – это область электротехнологии, в которой используют взаимодействие сильных электрических полей с электрически заряженными в них частицами твердого или жидкого вещества.

Рабочим органом в аппаратах ЭИТ являются сильные электрические поля (напряженность более 100 кВ/м). Объекты обработки - материалы, представляющие собой совокупность отдельных частиц размером от микрометра до десятков миллиметров (пыль, порошки, суспензии, семена, волокна и т.д.).

В основе процессов ЭИТ лежат четыре основных стадии: подача материала, его зарядка, движение заряженных частиц материала в электрическом поле, формирование готового продукта.