

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ОРЕНБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ  
ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ**

**Б1.В.04 Энергия электромагнитного поля в технологических процессах  
производства**

**Направление подготовки (специальность) 35.04.06 Агроинженерия**

**Профиль образовательной программы Электротехнологии и  
электрооборудование в сельском хозяйстве**

**Форма обучения очная**

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>1. Конспект лекций.....</b>	<b>3</b>
<b>1.1 Лекция № 1 Энергетические основы электротехнологии.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2 Лекция № 2,3,4 Основы теории и расчета электротермических установок.....</b>	<b>6</b>
<b>1.3 Лекция № 5 Электротермическое оборудование сельскохозяйственного назначения.....</b>	<b>18</b>
<b>1.4 Лекция № 6 Основные сведения. Обработка током.....</b>	<b>23</b>
<b>1.5 Лекция № 7 Электроимпульсная и ультразвуковая технологии.....</b>	<b>26</b>
<b>1.6 Лекция № 8 Проектирование электротехнологических установок и оборудования.....</b>	<b>31</b>
 <b>2. Методические указания по проведению практических занятий.....</b>	 <b>35</b>
<b>2.1 Практическое занятие № ПЗ-1 <i>Расчёт электродных нагревательных устройств.....</i></b>	<b>35</b>
<b>2.2 Практическое занятие № ПЗ-2,3 <i>Электрический и конструктивный расчёты нагревательных элементов .....</i></b>	<b>37</b>
<b>2.3 Практическое занятие № ПЗ-4,5 <i>Расчет нагревательных элементов печей сопротивления .....</i></b>	<b>41</b>
<b>2.4 Практическое занятие № ПЗ-6 <i>Тепловой расчет электропечей сопротивления.</i></b>	<b>44</b>
<b>2.5 Практическое занятие № ПЗ-7,8 <i>Определение параметров, выбор и проверочный расчет электрокалориферной установки.....</i></b>	<b>50</b>
<b>2.6 Практическое занятие № ПЗ-9 <i>Расчет нагревательных проводов и кабелей.....</i></b>	<b>52</b>
<b>2.7 Практическое занятие 10,11 (ПЗ-10,11) <i>Расчет установки для обработки грубых кормов электрическим током .....</i></b>	<b>54</b>
<b>2.8 Практическое занятие 12,13 (ПЗ-12,13) <i>Конструктивный расчет электросепаратора.....</i></b>	<b>56</b>
<b>2.9 Практическое занятие 14 (ПЗ-14) <i>Технологический расчет электросепаратора.....</i></b>	<b>57</b>
<b>2.10 Практическое занятие 15 (ПЗ-15) <i>Расчет установок электрогидравлического эффекта .....</i></b>	<b>59</b>
<b>2.11 Практическое занятие 16,17 (ПЗ-16,17) <i>Расчет параметров электроплазмолизатора растительного сырья .....</i></b>	<b>61</b>

# 1. КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

## 1. 1 Лекция № (2 часа).

**Тема:** «Энергетические основы электротехнологии»

### 1.1.1 Вопросы лекции:

1. Превращение энергии электромагнитного поля
2. Характеристики электромагнитного поля как носителя электрической энергии
3. Энергетические взаимопревращения в живых организмах

### 1.1.2 Краткое содержание вопросов:

#### 1. Превращение энергии электромагнитного поля

Электромагнитными колебаниями называют периодические изменения напряжённости электрического поля, магнитной индукции, силы тока, заряда и других характеристик электромагнитного поля. Электромагнитные колебания представляют основу электрической энергии используемой человеком. Они применяются в телевидении, а также в радио и телефонной связи. Работа мозга, сердца и мышц человека сопровождается появлением электромагнитных колебаний. Все световые явления тоже являются электромагнитными колебаниями.

Как и механические колебания, электромагнитные колебания бывают свободными или вынужденными. Свободные электромагнитные колебания можно наблюдать в схеме, состоящей из катушки и конденсатора, называемой *колебательным контуром*. Зарядим конденсатор  $C$  колебательного контура, сообщив его пластинам заряд  $q$ . При этом

энергия электрического поля конденсатора составит  $W_{\text{э}} = \frac{q^2}{2C}$ . Замкнём конденсатор на катушку индуктивности  $L$  (рис. 9а), после чего конденсатор начнёт разряжаться через катушку, а заряд на его пластинах уменьшаться. Разряд конденсатора будет постепенным, а не мгновенным, так как ЭДС самоиндукции в катушке станет противодействовать нарастанию силы тока.

Очевидно, что, разряжаясь через катушку, конденсатор будет терять свою энергию, однако, одновременно с уменьшением электрического поля будет расти энергия

магнитного поля  $W_{\text{м}} \text{ катушки}$ , через которую течёт ток  $I$ ,  $W_{\text{м}} = \frac{LI^2}{2}$ . Если считать, что потеря энергии в этом контуре не происходит, то полная энергия электромагнитного поля контура будет постоянна:

$$W_{\text{э}} + W_{\text{м}} = \frac{q^2}{2C} + \frac{LI^2}{2} = \text{const}.$$

Из формулы следует, что, когда конденсатор окажется полностью разряженным, сила тока в колебательном контуре достигнет максимального значения и вся энергия электрического поля конденсатора превратится в энергию магнитного поля катушки. Однако из-за явления самоиндукции ток в катушке не может уменьшиться мгновенно, и поэтому начинается перезарядка конденсатора, которая происходит, пока сила тока в

контуре не станет равной нулю. В этот момент времени энергия магнитного поля катушки целиком превратится в электрическую энергию конденсатора, и при этом конденсатор будет обладать тем же зарядом, что и сначала, но заряды на пластинах, просто, поменяются местами. Далее конденсатор опять начнёт разряжаться, и колебательный контур вернётся в исходное состояние.

Если пренебречь потерями энергии в колебательном контуре, то колебания тока в катушке и напряжения между пластинами конденсатора являются незатухающими гармоническими колебаниями, сдвинутыми по фазе  $\pi/2$ . Расчёты показывают, что период  $T$  таких колебаний зависит от индуктивности катушки  $L$  и ёмкости конденсатора  $C$  следующим образом:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}$$

В действительности протекание тока в колебательном контуре всегда сопровождается потерями энергии. Одной из причин этих потерь является нагревание катушки и соединительных проводов. Поэтому со временем энергия электромагнитного поля переходит во внутреннюю энергию элементов колебательного контура, и амплитуда электромагнитных колебаний постепенно уменьшается до нуля.

## 2. Характеристики электромагнитного поля как носителя электрической энергии

**Графическое изображение магнитного поля.** Графически магнитное поле изображают магнитными силовыми линиями, которые проводят так, чтобы направление силовой линии в каждой точке поля совпадало с направлением сил поля; магнитные силовые линии всегда являются непрерывными и замкнутыми. Направление магнитного поля в каждой точке может быть определено при помощи магнитной стрелки. Северный полюс стрелки всегда устанавливается в направлении действия сил поля. Конец постоянного магнита, из которого выходят силовые линии, принято считать северным полюсом, а противоположный конец, в который входят силовые линии,— южным полюсом (силовые линии, проходящие внутри магнита, не показаны). Распределение силовых линий между полюсами плоского магнита можно обнаружить при помощи стальных опилок, насыпанных на лист бумаги, положенный на полюсы. Для магнитного поля в воздушном зазоре между двумя параллельно расположенными разноименными полюсами постоянного магнита характерно равномерное распределение силовых магнитных линий (силовые линии, проходящие внутри магнита, не показаны).

Для более наглядного изображения магнитного поля силовые линии располагают реже или гуще. В тех местах, где магнитное поле сильнее, силовые линии располагают ближе друг к другу, там же, где оно слабее,— дальше друг от друга. Силовые линии нигде не пересекаются.

Во многих случаях удобно рассматривать магнитные силовые линии как некоторые упругие растянутые нити, которые стремятся сократиться, а также взаимно отталкиваются друг от друга (имеют взаимный боковой распор). Такое механическое представление о силовых линиях позволяет наглядно объяснить возникновение электромагнитных сил при взаимодействии магнитного поля и проводника с током, а также двух магнитных полей.

Основными характеристиками магнитного поля являются магнитная индукция, магнитный поток, магнитная проницаемость и напряженность магнитного поля.

**Магнитная индукция и магнитный поток.** Интенсивность магнитного поля, т. е. способность его производить работу, определяется величиной, называемой магнитной индукцией. Чем сильнее магнитное поле, созданное постоянным магнитом или

электромагнитом, тем большую индукцию оно имеет. Магнитную индукцию  $B$  можно характеризовать плотностью силовых магнитных линий, т. е. числом силовых линий, проходящих через площадь  $1 \text{ м}^2$  или  $1 \text{ см}^2$ , расположенную перпендикулярно магнитному полю. Различают однородные и неоднородные магнитные поля. В однородном магнитном поле магнитная индукция в каждой точке поля имеет одинаковое значение и направление. Однородным может считаться поле в воздушном зазоре между разноименными полюсами магнита или электромагнита при некотором удалении от его краев. Магнитный поток  $\Phi$ , проходящий через какую-либо поверхность, определяется общим числом магнитных силовых линий, пронизывающих эту поверхность, например катушку 1, следовательно, в однородном магнитном поле

$$\Phi = BS$$

где  $S$  — площадь поперечного сечения поверхности, через которую проходят магнитные силовые линии. Отсюда следует, что в таком поле магнитная индукция равна потоку, поделенному на площадь  $S$  поперечного сечения:

$$B = \Phi/S$$

Если какая-либо поверхность расположена наклонно по отношению к направлению магнитных силовых линий (рис. 37, б), то пронизывающий ее поток будет меньше, чем при перпендикулярном ее положении, т. е.  $\Phi_2$  будет меньше  $\Phi_1$ .

В системе единиц СИ магнитный поток измеряется в веберах (Вб), эта единица имеет размерность В\*с (вольт-секунда). Магнитная индукция в системе единиц СИ измеряется в теслах (Тл);  $1 \text{ Тл} = 1 \text{ Вб/м}^2$ .

**Магнитная проницаемость.** Магнитная индукция зависит не только от силы тока, проходящего по прямолинейному проводнику или катушке, но и от свойств среды, в которой создается магнитное поле. Величиной, характеризующей магнитные свойства среды, служит абсолютная магнитная проницаемость  $\mu_a$ . Единицей ее измерения является генри на метр ( $1 \text{ Гн/м} = 1 \text{ Ом*с/м}$ ).

В среде с большей магнитной проницаемостью электрический ток определенной силы создает магнитное поле с большей индукцией. Установлено, что магнитная проницаемость воздуха и всех веществ, за исключением ферромагнитных материалов, имеет примерно то же значение, — что и магнитная проницаемость вакуума. Абсолютную магнитную проницаемость вакуума называют магнитной постоянной. Магнитная проницаемость ферромагнитных материалов в тысячи и даже десятки тысяч раз больше магнитной проницаемости неферромагнитных веществ.

**Напряженность магнитного поля.** Напряженность  $H$  не зависит от магнитных свойств среды, но учитывает влияние силы тока и формы проводников на интенсивность магнитного поля в данной точке пространства

Следовательно, в среде с неизменной магнитной проницаемостью индукция магнитного поля пропорциональна его напряженности. Напряженность магнитного поля измеряется в амперах на метр (А/м) или амперах на сантиметр (А/см).

### 3. Энергетические взаимопревращения в живых организмах

Механизм преобразования в живых тканях энергии ЭМП в тепловую считали единственно возможной причиной любых биологических эффектов, вызываемых ЭМП от низких частот до сверхвысоких. На этой основе были разработаны и получили широкое распространение методы применения ЭМП высоких, ультравысоких и сверхвысоких частот для лечения различных заболеваний. Исходя из этой концепции,

пытались оценивать предельно допустимые интенсивности ЭМП радиочастот при изучении их профессиональной вредности.

Тепловая концепция биологических эффектов ЭМП противоречит результатам ряда исследований, проведенных с ЭМП слабых интенсивностей. Однако в тех случаях, когда биологические объекты подвергаются воздействию ЭМП достаточно высоких интенсивностей (при которых тепловой эффект уже возможен), она представляется полезной. Поэтому мы подробно рассмотрим теоретические и экспериментальные данные о тепловых эффектах ЭМП различных частот.

В низкочастотном и высокочастотном диапазонах преобразование энергии ЭМП в тепловую связано в основном с потерями проводимости, возникающими за счет выделения, в тканях джоулева тепла индуцированными в них ионными токами.

До частот порядка 10 МГц размеры тела человека и крупных животных (а тем более мелких) малы по сравнению с длиной волны, а ткани тела можно рассматривать как проводящую среду. Поэтому выполняются условия квазистационарности и расчеты можно производить как для статического поля; мощность ЭМП, поглощаемая в единице объема тела, может быть в этом случае вычислена по законам постоянного тока:

$$P = i^2 \rho \text{ Вт/см}^3$$

Величину плотности тока  $i$  следует вычислять применительно к форме и электрическим параметрам биологического объекта. Такой расчет для человека, находящегося в переменном электрическом или магнитном поле в диапазоне частот от 100 КГц до 1 МГц, сделан при следующих допущениях:

1. Тело человека приближенно рассматривается как гомогенный (по электрическим свойствам) проводящий эллипсоид;

2. Рассматривается только однородное электрическое или магнитное поле, в котором тело (эллипсоид) расположено так, что его большая ось параллельна силовым линиям.

При этих условиях плотность тока в случае электрического поля равна

$$i_e = 1,3 \cdot 10^{-13} \cdot f \cdot E \text{ а/см}^2,$$

а в случае магнитного поля

$$i_m = 1,3 \cdot 10^{-11} \cdot f \cdot H \text{ а/см}^2$$

( $E$  выражено в В/м,  $H$  — в А/м,  $f$  — в Гц).

В диапазонах ультравысоких и сверхвысоких частот преобразование энергии ЭМП в тепловую связано уже не только с потерями проводимости, но и с диэлектрическими потерями. При этом доля диэлектрических потерь в общем поглощении энергии ЭМП в тканях возрастает с частотой. Например, потери, связанные с релаксацией молекул воды в тканях, при частоте 1 ГГц составляют около 50% от общих потерь, при частоте 10 ГГц — около 90% и при частоте 30 ГГц — около 98%.

## 1. 2 Лекция №2,3,4 (6часов).

**Тема:** «Основы теории и расчета электротермических установок»

### 1.2.1 Вопросы лекции:

1. Способы преобразования электрической энергии в тепловую.
2. Электротермическое оборудование, классификация, область применения в сельскохозяйственном производстве
3. Электрический нагрев сопротивлением
4. Электродуговой нагрев

5. Индукционный нагрев
6. Диэлектрический нагрев
7. Электронно-лучевой и лазерный нагрев
8. Термоэлектрический нагрев и охлаждение

### **1.2.2 Краткое содержание вопросов:**

#### **1. Способы преобразования электрической энергии в тепловую**

Электротермия (от электро... и греч. *thérme* - жар, тепло) – прежде всего, это:

- прикладная наука о процессах преобразования электрической энергии в тепловую энергию;
- раздел электротехники, рассматривающий вопросы проектирования, изготовления и эксплуатации электротермических установок;
- отрасль энергетики, охватывающая вопросы потребления электрической энергии для нагрева, фазового преобразования материала или сырья, обогрева в промышленности, на транспорте, в сельском хозяйстве, медицине и быту;
- совокупность электротехнологических процессов с использованием теплового действия электрической энергии в различных отраслях народного хозяйства.

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.

Понятие «электротермические установки» (или «электротермическое оборудование») включает в себя следующее электротехнологическое оборудование: электрические печи, плазменные реакторы, электрические нагревательные установки, приборы промышленного, коммунального и бытового назначения и т.п. Применение электрической энергии для генерирования 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 регулировать 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 технологического процессов; возможность создания в рабочем пространстве электротермических установок вакуума, что позволяет использовать давление как фактор регулирования параметров технологического процесса (вакуумные или компрессионные электрические печи), применять контролируемые (инертные или защитные) атмосферы для защиты нагреваемых материалов и изделий от вредных воздействий воздуха (в частности, уменьшение угара); отсутствие дымовых газов (продуктов сгорания топлива), что позволяет увеличить коэффициент использования тепла – КПД электротермических установок, обуславливая чистоту их рабочих поверхностей; транспортабельность и простоту подачи электрической энергии (по линиям электропередачи).

Более интенсивное и широкое развитие электротермии сдерживается из-за существующих недостатков, присущих такому способу генерации теплоты: более высокая стоимость эксплуатации электротермических установок по сравнению с другими типами нагревателей и печей; высокая стоимость изготовления, комплектации и эксплуатации электротермического оборудования, а следовательно, большие капитальные затраты, более высокие требования к технической культуре производства,

большой расход дорогих и дефицитных материалов на изготовление электротермического оборудования; меньшая надёжность, долговечность и ремонтпригодность электротермических установок; зависимость работы электротермической установки от режима работы энергосистемы.

## **2. Электротермическое оборудование, классификация, область применения в сельскохозяйственном производстве**

В сельском хозяйстве наиболее распространены электроводонагреватели. Принципиально они мало отличаются друг от друга. Их основные части: корпус, размещенные в нем электроды, устройство для регулирования мощности и патрубки для провода холодной и отвода горячей жидкости. Основные преимущества электродных водонагревателей – высокая надежность в работе; простота конструкции и схемы управления; удобство обслуживания; использование неперегораемых элементов – электродов со сроком службы 7...9 лет; более высокий КПД по сравнению с элементными нагревателями, работающих на ТЭНах.

Основные недостатки – значительная зависимость надежности и долговечности установок от параметров воды; значительная зависимость их мощности от температуры нагреваемой воды, удельное электрическое сопротивление которой падает из-за резкого увеличения в ней количества ионов; электрохимическая коррозия электродов и электролиз воды и растворимых в ней солей, наличие в воде продуктов «растворения» железа и продуктов электролиза; образование гремучего газа при большой плотности тока на электродах и возможность взрыва установки.

Элементные водонагреватели используют для нагрева воды на технологические и санитарно - гигиенические нужды ферм и комплексов, для подогрева воды в автотракторных мастерских, в теплично – парковом хозяйстве, в консервном производстве и при выпечке хлеба, для изготовления различной питьевой воды и пива, а также на других сельскохозяйственных предприятиях.

Основные преимущества элементных ЭНУ- мощность, потребляемая из сети нагревателем, не зависит от удельного электрического сопротивления воды и практически не зависит от температуры воды; ЭНУ может быть сразу же использована для нагрева питьевой воды; у нагревателей имеется возможность быстрой замены вышедших из строя ТЭНов.

Недостатки элементных ЭНУ – выход из строя ТЭНов из-за прекращения подачи или упуска воды из системы; меньшее значение мощности на единицу массы и объема по сравнению с электродными ЭНУ, а также более сложная конструкция с более низким КПД

Электрокалориферная установка (ЭКУ) предназначена для обогрева помещений промышленного и сельскохозяйственного назначения, также применяется в строительстве для сушки штукатурки, строительных материалов, краски и создания комфортных условий при выполнении работ. Установка при работе создает перепад по температуре входящего и выходящего воздуха от +35°C до +65°C, что позволяет использовать его для приточной вентиляции и обогрева в режиме рециркуляции. При необходимости, в теплое время установку можно использовать как высокопроизводительный вентилятор, отключив электрокалорифер; снизить перепад температур входящего и выходящего воздуха за счет отключений секций ЭКУ. Установка используется в закрытых помещениях при температуре окружающей среды от -20°C до +40°C, не содержащей легковоспламеняющихся веществ и пыли. Электрокалориферная установка состоит из электрокалорифера, осевого вентилятора; может устанавливаться на площадку или подвешиваться на кронштейны.

Областью применения электродных термосифонных водонагревателей является получение горячей воды, используемой в системах отопления, для кормоприготовления, полива растений, для удовлетворения санитарно- гигиенических нужд, в ремонтных



мастерских и других процессах. На фермах для мытья молочной посуды и оборудования используют горячую воду температурой 80...90°C, воду с температурой 50°C применяют для санитарной и гигиенической обработки поголовья, для поения животных воду подогревают до 12°C.

Электродные термосифонные водонагреватели (ЭТВН) аккумуляционного и проточного типа для систем отопления и горячего водоснабжения различного назначения мощностью 2, 6, 12, 18, 25, 40, 60, 100, 250 кВт не имеют принципиальных конструктивных отличий. Особенность заключается лишь в способе теплопередачи: в ЭТВН аккумуляционного типа процесс нагрева воды осуществляется в результате свободной конвекции, а проточного - вынужденной. Данное обстоятельство учитывается при выборе расчетных выражений для коэффициента теплоотдачи от стенки трубы к нагреваемой среде при расчете теплообменника.

### **3. Электрический нагрев сопротивлением**

В электротермических процессах широкое распространение получил электрический нагрев сопротивлением, при котором электрическая энергия преобразуется в тепловую непосредственно в проводящем материале, являющемся элементом электрической цепи.

При подключении проводящего материала к источнику ЭДС в нем создаётся электрическое поле, под действием которого свободные заряды (ионы, электроны) начинают перемещаться. Сталкиваясь с нейтральными атомами и молекулами, они сообщают им запас кинетической энергии, который расходуется на увеличение теплового движения частиц, что приводит к повышению температуры вещества.

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, 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, пропорционально квадрату силы тока проводимости  $I$  и зависит от сопротивления нагреваемого материала  $R$  и времени нагрева  $t$ .

$$Q = I^2 R t \text{ (Дж)}.$$

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

Прямой нагрев сопротивлением применяют для электропроводящих сред и материалов. Нагрев осуществляется за счёт пропускания электрического тока непосредственно через нагреваемую среду или материал.

Прямой нагрев сопротивлением, в свою очередь подразделяется на два способа: а) прямой нагрев сопротивлением металлических тел, называемый электроконтактным; б) прямой нагрев проводящих материалов, обладающих ионной проводимостью, который называется электродным.

С другой стороны, прямой нагрев проводников первого рода, переносчиками тока в которых являются электроны (ферромагнитные материалы), называется электроконтактным.

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.

Сопротивление проводника постоянному току определяется по формуле:

$$r = \rho \cdot l / S (\text{Ом}),$$

где  $\rho$  - удельное электрическое сопротивление проводника, Ом м;

$l$  - длина проводника, м;

$S$  - площадь поперечного сечения, м<sup>2</sup>.

Удельное электрическое сопротивление металлических проводников (проводников первого рода) зависит от материала, химического состава.

#### 4. 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. В ЭТУ возбуждение дуги происходит при первоначальном касании электродов, к которым подведено напряжение. В момент короткого замыкания электроды разогреваются. При отводе электродов за счёт термоэлектронной ионизации газа возникает электрическая дуга, представляющая собой сильно ионизированную смесь газов и паров материала анода и катода. Канал дуги по длине неоднороден и состоит из трёх последовательных участков: 1) прикатодный (-); 2) основной столб дуги; 3) прианодный участок (+).

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

- открытая дуга, горящая в воздухе, парах металла, и т.д.;
- 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. Дуга и источник питания образуют систему, которая будет находиться в устойчивом равновесии, если при падающей ВАХ дуги внешняя характеристика источника будет более крутопадающей.

Устойчивость дуги с возрастающей ВАХ обеспечивается, если внешняя характеристика источника менее возрастающая. Регулирование сварочного тока необходимо при сваривании деталей различной толщины. В качестве источников питания дуги применяют: сварочные трансформаторы; генераторы постоянного тока (преобразователи); полупроводниковые выпрямители.

Швы сварных соединений в зависимости от взаимного расположения деталей подразделяют на стыковые, угловые, тавровые и нахлесточные. Форма и размеры шва зависят от режима сварки. При ручной дуговой сварке основными параметрами режима являются диаметр электрода, значения тока и напряжения, род и полярность тока, скорость сварки. Для высокой производительности сварочного процесса и получения качественного соединения дуга должна гореть устойчиво. Это зависит от многих

факторов, среди которых основное значение имеют характеристики источников питания и наличие в материале свариваемых деталей и электродов – элементов с малым потенциалом ионизации. Для повышения устойчивости горения дуги переменного тока в флюсы вводят элементы с низким потенциалом ионизации – калий, кальций, натрий. Однако все же на постоянном токе дуга горит надежнее. Поэтому качество сварного шва, выполненного на постоянном токе, выше, чем на переменном.

При выборе значения сварочного тока необходимо помнить, что с его увеличением возрастает количество выделенной теплоты и повышается давление дуги. При этом глубина провара возрастает. Большой ток повышает скорость плавления электрода и приводит к образованию швов с повышенной напряженностью металла. Значение сварочного тока определяется также видом соединения: тавровые и нахлесточные соединения выполняют большим током по сравнению со стыковым.

Если для работ используют электроды диаметром 1.5...6 мм, что соответствует толщине свариваемого металла 0.5...10 мм, значение рабочего тока ориентировочно можно определить по формуле:

$$I_{св} = K \cdot d \text{ эл}$$

Режим работы источников питания при ручной дуговой сварке характеризуется тем, что периоды нагрузки чередуются с паузами. Источник нагружается током только во время горения дуги, длительность этого периода определяется временем расплавления одного электрода. Минимальное время паузы зависит от времени, нужного для замены электрода и повторного зажигания дуги. Длительность перерыва в горении дуги определяется также необходимостью замены деталей или передвижения сварщика с электрододержателем к новому участку сварки.

Номинальным режимом работы источников питания обычной дуговой сварки, как правило, является режим с ПР = 60% или ПВ = 65% при длительности цикла 5 мин. Общая продолжительность цикла нормируется, так как на температуру обмоток влияет абсолютное значение времени  $\tau I$  горения дуги.

## 5. Индукционный нагрев

Индукционный нагрев металлов основан на двух законах физики: законе электромагнитной индукции Фарадея – Максвелла и законе Джоуля – Ленца. Металлические тела (заготовки, детали и др.) 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:

$$e = -\delta\Phi/\delta\tau$$

Под действием ЭДС индукции в телах протекают вихревые (замкнутые внутри тел) токи, выделяющие теплоту по закону Джоуля – Ленца.

Рассмотренные превращения энергии электромагнитного поля в отличие от нагрева методом сопротивления позволяют передать электрическую энергию индуктора в нагреваемый материал бесконтактно, а также выделить теплоту непосредственно в нагреваемом предмете.

Чтобы уяснить особенности электромагнитных процессов при индуктивном нагреве и выявить факторы, определяющие распространение электромагнитного поля в проводящей среде, следует подробно разобраться, что же происходит при падении плоской электромагнитной волны на однородное металлическое тело.

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

При нагреве немагнитных (цветных) металлов, для которых  $\mu=1$ , изменяется их удельное сопротивление, а при нагреве ферромагнитных металлов (сталей) изменяется и относительная магнитная проницаемость.

Глубина проникновения тока в сталь при температуре магнитных превращений изменяется скачком. В действительности удельное сопротивление и магнитная проницаемость во время нагрева зависят от температуры, а магнитная проницаемость еще и от напряженности магнитного поля. Следовательно, при нагреве изменяется коэффициент и мощность, поглощаемая металлом.

В заключении можно подчеркнуть, что индукционный нагрев –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. И, наконец, 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.

Уже было отмечено, что плотность тока по сечению нагреваемого проводящего тела не одинакова. Наибольшего значения она достигает на поверхности, а по мере приближения к центру убывает. Следует напомнить ещё раз, что это явление называется поверхностным эффектом.

В зависимости от используемых частот установки индукционного нагрева подразделяют на: 1) низкочастотные (50Гц); 2) среднечастотные (до 10 кГц); 3) высокочастотные (свыше 10 кГц).

## 6. Диэлектрический нагрев

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

Рассмотрим пример расчёта нагревателей типа «многовитковый индуктор в ферромагнитной трубе». Для расчёта индукционных нагревателей такого типа можно использовать упрощённую методику.

Методика основана на математической обработке экспериментальных данных, полученных для труб диаметром  $d_{тр} = 0,015; 0,02; 0,025$  м.

При температуре нагрева трубы до  $T_{п} = 373$  К тепловой поток, Вт/м, приходящийся на 1 м длины нагревателя определяют по выражению:

$$\Phi_1 = k_1 \cdot \Delta T - k_2,$$

где  $\Delta T$  – перепад температур между окружающей средой и трубой, К.

Напряжение, которое необходимо приложить к отрезку нагревателя длиной в 1 м, В/м, определяют по формуле:

$$U_1 = k_3 + 0,006 \cdot \Delta T,$$

где  $k_1; k_2; k_3$  – коэффициенты, зависящие от диаметра трубы  $d$

Таблица 1. Значения коэффициентов  $k_1; k_2; k_3$

Диаметр трубы $d$ , м	$k_1$	$k_2$	$k_3$
0.015	6.00	0.96	0.35
0.020	7.50	1.25	0.33
0.025	9.00	1.55	0.31

По расчётным значениям  $U_1$  и  $\Phi_1$  определяют конструктивные параметры нагревателя.

Определяют длину провода, м, индуктора на фазу:

$$l_{np} = \frac{U_{\phi}}{U_l}$$

Определяют длину нагревателя, м, подключаемого на фазнонапряжение питающей сети:

$$l_{\phi} = \frac{P_{\phi}}{\Phi_l}$$

Определяют число проводов, прокладываемых в трубе:

$$n_{np} = \frac{l_{np}}{l_{\phi}}$$

Определяют ток индуктора, А:

$$I = 1,09 \frac{P_{\phi}}{U_{\phi}}$$

По  $I_{расч}=I$  и температуре поверхности нагревателя  $T_n$  выбирают марку и сечение провода.

Диэлектрический нагрев используют для нагрева непроводящих материалов (диэлектриков), а также полупроводников и проводников. 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  $D$ .

$$\vec{J} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

Диэлектрик, подлежащий нагреву, помещают между металлическими обкладками конденсатора, подключенного к источнику переменного тока. Мощность, Вт/м<sup>3</sup>, выделяемая в единице объема нагреваемого диэлектрика, определяется выражением, известным из курса ТОЭ при подстановке в которое  $\epsilon_0 = 1/4\pi \cdot (9 \cdot 10^9) \text{ Ф/м}$ :

$$P_v = 5,55 \cdot 10^{-11} \cdot f \cdot E_2 \cdot \epsilon_r \cdot \operatorname{tg} \delta$$

Из уравнения следует, что диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_r$  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. Характер зависимости  $\epsilon_r$  и  $\operatorname{tg} \delta$  от частоты показан на рисунке

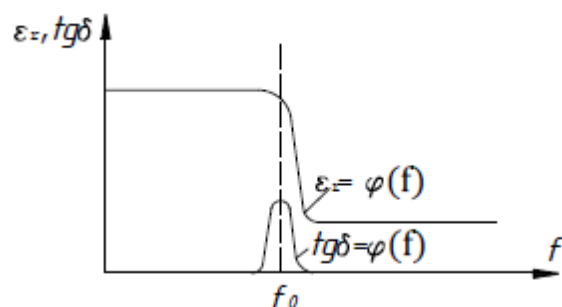


Рисунок 1. Зависимость  $\epsilon_r$  и  $\text{tg}\delta$  от частоты

При низких частотах смещение зарядов в диэлектрике (поляризация) успевает следовать за изменениями электрического поля, поэтому поглощение энергии незначительно. С повышением частоты скорость смещения зарядов возрастает, поглощение энергии увеличивается, поэтому  $\text{tg}\delta$  на некоторой частоте  $f_0$  достигает максимального значения. При дальнейшем повышении частоты заряды не успевают смещаться, отслеживая изменения электрического поля. Поэтому  $\epsilon_r$  уменьшается, поглощение энергии при малых смещениях снижается и, следовательно, уменьшается и  $\text{tg}\delta$ . В зависимости от структуры диэлектриков и характера поляризации кривая  $\text{tg}\delta$  может иметь несколько максимумов, а кривая  $\epsilon_r$  – несколько ступеней снижения. Чтобы увеличить объемную плотность мощности, выделяющейся в диэлектрике, т.е. для интенсификации процесса нагрева, используют высокие и сверхвысокие частоты, а также высокие напряженности. Однако с повышением частоты уменьшается глубина проникновения электромагнитной волны в диэлектрик. Глубину проникновения электромагнитной энергии, определяемую как расстояние  $z_0$  от поверхности диэлектрика, на котором напряженность электрического поля

убывает в  $e$  раз, находят по формуле:

$$z_0 = \frac{\lambda}{\pi \cdot \sqrt{2 \cdot \epsilon_r \cdot (\sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta} - 1)}}$$

где  $\lambda$  - длина волны, соответствующая рабочей частоте.

Так как в большинстве случаев  $\text{tg}\delta \ll 1$ , то:

$$z_0 = \frac{\lambda}{\pi \cdot \sqrt{\epsilon_r} \cdot \text{tg}\delta}$$

В нашей стране для термообработки в СВЧ-диапазоне наиболее часто используют электромагнитные колебания на частотах 433, 915, 2375 МГц.

## 7. Электронно-лучевой и лазерный нагрев

Техника электронно-лучевого нагрева (плавка и рафинирование металлов, размерная обработка, сварка, термообработка, нанесение покрытий испарением, декоративная обработка поверхности) создана на основе достижений физики, электроники, электронной оптики и вакуумной техники.

После открытия электрона и измерения его отношения заряда к массе началось широкое изучение свойств электронных потоков, их получения и взаимодействия с электрическими и магнитными полями. Электронный микроскоп был создан трудами ряда ученых, в том числе Н. Рус-ка, М. фон Арденна (Германия), В.К. Зворыкина (США) в 20-30-х годах. В нем применялись электронные пушки небольшой мощности с малыми токами и большими разгоняющими напряжениями. Тогда же были разработаны электростатические и магнитные системы управления электронным лучом.

Электронные пушки. Электронно-лучевые установки с кольцевыми катодами вначале получили широкое распространение, в частности в США, благодаря простоте конструкции, в которой катод расположен прямо в рабочей камере. Однако из-за невозможности сохранения высокого вакуума при плавке и возникновения электрических пробоев такая конструкция оказалась ненадежной, и поэтому стали разрабатываться конструкции электронных пушек со своей вакуумной системой.

Для испарения материала (алюминий, цирконий, сталь, различные сплавы и др.) созданы специальные электронно-лучевые испарители. Промышленный испаритель подобного типа был установлен в ГДР в 1971 г. на основе разработки М. фон Арденне. На стальную ленту шириной 400 мм наносилось двустороннее покрытие алюминием толщиной 2 мкм на сторону при скорости движения ленты до 3 м/с.

Агрегаты такого типа также разрабатывала фирма «Лейбольд-Хереус» (ФРГ): общая мощность электронно-лучевых пушек 1500 кВт, испарителя 1500 кВт, ширина ленты 1000 мм, скорость ее движения до 5 м/с. Фирма «ЮС Стил» (США) изготавливала установки для ленты шириной до 1250 мм при скорости до 7,5 м/с.

Плавка тугоплавких металлов, в том числе зонная плавка - получение монокристаллов тугоплавких металлов. В конце 50-х в США ряд фирм, в том числе и «Темескал металлургикал», разработали оборудование для получения ниобия, тантала, молибдена и других тугоплавких металлов высокой чистоты. В 1959 г. появилась публикация данных о печи фирмы «Темескал металлургикал», позволяющей выплавлять слитки тугоплавких металлов массой до 90 кг с двумя, электронными пушками для плавления шихты и подогрева металла в кристаллизаторе. При плавке ниобия скорость плавления достигала 110 кг/ч при расходе энергии 1100 кВт-ч/т. Мощность установки 225 кВт. К 1970 г. в различных странах имелось более 100 электронно-лучевых плавильных печей мощностью до 1200 кВт, выплавлявших слитки массой до 12 т.

Уже в 60-х годах прорабатывались конструкции ЭЛУ с кольцевым катодом или тремя аксиальными пушками для вертикальной зонной плавки с целью получения монокристаллов тугоплавких металлов. Такие работы проводились в Институте металлургии им. А.А. Байкова АН СССР. В 1967 г. в США эта же технология использовалась для получения монокристаллов кремния.

Лазеры — это генераторы света (квантовые генераторы оптического диапазона). В основу их работы положено усиление электромагнитных колебаний с помощью индукционного излучения атомов (молекул). Лазерное излучение монохроматично, распространяется очень узким пучком и характеризуется чрезвычайно высокой концентрацией энергии. Для промышленных целей применяют наиболее часто CO<sub>2</sub>-лазеры непрерывно-волнового типа мощностью 0,5 — 5 кВт. Применение лазеров для термической обработки основано на трансформации световой энергии в тепловую.

Под воздействием лазерного излучения за короткий промежуток времени ( $10^{-8}$ — $10^{-7}$  с) поверхность детали из стали или чугуна нагревается до очень высоких температур. Распространение теплоты в глубь металла осуществляется путем теплопроводности. После прекращения действия лазерного излучения происходит закалка нагретых участков, благодаря интенсивному отводу теплоты в глубь металла (самозакалка). Скорость охлаждения составляет  $10^8$ — $10^5$  °C/с.

Нагрев лазером для термической обработки осуществляется при удельной мощности  $10^3$ — $10^4$  Вт/см<sup>2</sup>. Для снижения отражательной способности поверхности металла и, следовательно, повышения эффективности лазерного нагрева на поверхность наносят пленки сульфидов (Fe<sub>2</sub>S<sub>3</sub>), фосфатов (Mg<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>, Zn<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>), а также сажи, коллоидный раствор углерода в ацетоне и другие неметаллы и краски.

Нагрев может осуществляться лазерами импульсного и непрерывного излучения. При импульсном излучении зона лазерного воздействия имеет форму круга диаметром D, а при непрерывном — полосу шириной до 3 мм. Для обработки поверхности необходимо

сканировать луч с взаимным перекрытием или без перекрытия зон упрочнения. При обработке с перекрытием пятен имеются зоны многократного нагрева и зоны отпуска (нагрев ниже  $A_{сг}$ ) с пониженной

Лазеры непрерывного излучения более производительны и обеспечивают равномерность упрочнения. Скорость обработки поверхности составляет  $10^2$ — $10^4$  мм/мин. При перекрытии полос также образуются зоны отпуска, поэтому в некоторых случаях полосы наносятся на некотором расстоянии друг от друга.

В зависимости от плотности мощности лазерного излучения нагрев осуществляется как с расплавлением металла, так и без него. Критическая удельная мощность, выше которой происходит оплавление поверхности, составляет  $(2—6) 10^4$  Вт/см<sup>2</sup>. Чем выше мощность излучения, меньше диаметр пятна и скорость перемещения, тем больше толщина упрочненного слоя. Наибольшая толщина слоя без оплавления стали не превышает 1,5—2,0 мм, а чугуна — 1,0—1,5 мм. При обработке с оплавлением толщина упрочненного слоя больше.

Структура по толщине зоны лазерного воздействия на среднеуглеродистых (0,35—0,45 % С) сталях включает;

1) зону плавления, состоящую чаще из дендритных кристаллов мартенсита, — Н800—850;

2) зону термического влияния (нагрев до температуры выше  $A_{с3}$ ), состоящую из белого нетравящегося слоя азотисто-углеродистого мартенсита с твердостью Н800: нижняя граница слоя определяется зоной неполной закалки (нагрев в интервале температур  $A_{сг}$ — $A_{с3}$ ) со структурой мартенсит и феррит;

3) зону отпуска с пониженной твердостью (Н500—650);

4) зону исходной структуры и твердости.

Твердость после обработки лазером высокоуглеродистых сталей (У8, У10, ШХ15 и др.) достигает Н1000—1100.

Поверхностная закалка при нагреве лазером без оплавления повышает в 2—4 раза (в зависимости от стали) износостойкость, на 70—80 % предел выносливости при изгибе и на 60—70 % — предел контактной выносливости.

Лазерную обработку успешно применяют для поверхностного упрочнения отливок из перлитного серого, ковкого и высокопрочного чугунов. Благодаря оплавлению поверхности и образованию ледебуритной эвтектики (отбел чугуна) и мартенситного подслоя твердость на поверхности достигает Н750—900. Частичное оплавление ухудшает чистоту поверхности. При отсутствии оплавления твердость после нагрева лазером повышается в результате закалки тонкого поверхностного слоя.

## 8. Термоэлектрический нагрев и охлаждение

В основе термоэлектрического метода лежат термоэлектрические явления, которые обычно сопутствуют один другому и обусловлены существованием взаимосвязи между тепловыми и электрическими процессами в проводниках и полупроводниках. 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 (рис.9). В цепи, замкнутой на миллиамперметр, можно обнаружить электрический ток, который будет протекать до тех пор, пока температуры спаев будут различные.

Термо ЭДС, мкВ, может быть определена как:  $E = e(T_2 - T_1)$



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.

Явление Зеебека широко используют в термометрии – в любой термопаре происходит непосредственное преобразование тепловой энергии в электрическую. Заметим, что коэффициент  $e$  для большинства металлов невелик и не превышает несколько микровольт на градус. В отличие от металлов коэффициент  $e$  у полупроводников значительно больше и составляет сотни микровольт на градус.

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. Явление Пельтье можно объяснить следующим образом. Так как в различных проводниках средняя энергия электронов, участвующих в переносе электрического тока, несходна, электроны при переходе из одного проводника в другой либо пополняют свою энергию, отнимая ее в месте контакта у атомов проводника, в который они перешли, либо, наоборот, передают этим атомам избыток энергии. В первом случае теплота Пельтье поглощается, а во втором – выделяется. Особенно сильно эффект Пельтье проявляется в системах, состоящих из полупроводников с электронной и дырочной проводимостью. При этом если электрический ток направлен от дырочного полупроводника к электронному, то тепловая энергия в контакте выделяется. Когда ток протекает от электронного полупроводника к дырочному, тепловая энергия в контакте поглощается.

Теплота Пельтье, Дж, определяется выражением:

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

Между коэффициентами Пельтье и Зеебека существует связь:

$$K_n = e \cdot T$$

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.

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

Эффект Томсона объясняется тем, что в более нагретом участке проводника средняя энергия носителей тока больше, чем в менее нагретом. Если носители тока перемещаются в направлении убывания температуры, то они избыток энергии отдают кристаллической решетке и выделяется теплота. Если носители тока движутся и противоположном направлении, то они пополняют свою энергию за счет энергии кристаллической решетки и теплота поглощается.

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. Заметим, что бытовые холодильники, по существу, являются тепловыми насосами – теплота забирается в холодильной камере (происходит охлаждение) и отдается окружающему пространству от испарителя (происходит нагрев) Распространенные компрессионные и абсорбционные агрегаты имеют значительную

массу, большие габаритные размеры и потребляют много электроэнергии. Кроме того, они не могут плавно регулировать температуру. Движущиеся части и газ – фреон ограничивают срок службы компрессоров. Этих недостатков лишены термоэлектрические тепловые насосы. Чтобы понять принцип их работы, рассмотрим термоэлемент, составленный из ветвей с дырочной (р-типа) и электронной (n-типа) проводимости.

Ветви термоэлемента соединяют, металлической пластиной. При пропускании тока через термоэлемент в направлении, указанном стрелкой, на n-p-переходе (холодном спае) поглощается, а на p-n-переходе (горячем спае) выделяется в единицу времени теплота Пельтье  $Q_P$  в соответствии с зависимостью:

Если при этом температура охлаждаемого спае  $T_1$ , 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 спае 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 спае может быть записано в следующем виде:

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

Уравнение теплового баланса для горячего спае запишется так:

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

Так как  $Q_r$  и  $Q_0$  представляют собой количество теплоты в единицу времени, то работа электрических сил (потребляемая мощность)

$$P = Q_r - Q_0 . \quad \text{или} \quad P = e \cdot I \cdot (T_2 - T_1) + I^2 \cdot R ,$$

Из анализа уравнения видно, что потребляемая термоэлементом мощность  $P$  расходуется на преодоление термоЭДС и активного сопротивления; термоэлемент при этом работает как тепловой насос, перекачивая теплоту от окружающей среды нагреваемому объекту.

Термоэлектрические устройства могут найти применение для охлаждения питьевой воды в полевых условиях. Вода охлаждается при протекании через термобатарею или в сосуде для ее хранения. Аналогичные охладители могут быть использованы и для молока. При этом необходимо, чтобы оно стекало тонким слоем по охлаждаемым сторонам термобатареи. Такая конструкция обеспечивает хороший теплообмен с молоком и легкий доступ к поверхностям, требующим мытья после пользования.

Термоэлектрические тепловые насосы особенно перспективно применять в качестве кондиционеров в различных производственных помещениях для поддержания комфортных условий по температуре. Легкий переход с охлаждения на нагрев и, следовательно, большая гибкость по сравнению с обычными системами дают значительные преимущества термоэлектрическим кондиционерам.

### 1. 3 Лекция №5 (2 часа).

**Тема:** «Электротермическое оборудование сельскохозяйственного назначения»

### **1.3.1 Вопросы лекции:**

1. Электрические водонагреватели
2. Особенности эксплуатации электрических водонагревателей
3. Электрокалориферные установки
4. Электросварочное оборудование для дуговой и контактной сварки

### **1.3.2 Краткое содержание вопросов:**

#### **1. Электрические водонагреватели**

Водонагреватель — устройство для непрерывного нагрева воды в местной системе водоснабжения. Для нагрева воды водонагреватель использует жидкое, твёрдое или газообразное топливо, электроэнергию или теплоноситель от внешнего источника энергии. По принципу действия водонагреватели делятся на накопительные и проточные.

Накопительный водонагреватель, или бойлер (от англ. boiler) представляет собой сравнительно большую ёмкость с размещённым в ней или, реже, под ней, источником тепла. Нагрев может производиться при помощи парового или водяного теплообменника — в нём циркулирует горячая вода в замкнутом контуре, нагреваемая, например, с помощью отопительного котла. Такие бойлеры называют бойлерами (водонагревателями) косвенного нагрева.

Бойлер может также нагреваться с помощью размещённого внутри него ТЭНа или расположенной под нагревательной ёмкостью газовой горелкой.

Существуют также комбинированные модели, включающие два или реже более видов нагревательных элементов. Например: ТЭН + теплообменник; теплообменник, работающий от системы отопления + теплообменник, нагреваемый солнечным коллектором.

Водонагревательная ёмкость снаружи защищена слоем теплоизоляции и защитным кожухом. Снаружи к нагревательному элементу подсоединяется пульт управления, обязательно включающий управление температурой. Обычно это биметаллический термостат. Нагрев включается, когда термодатчик регистрирует в баке температуру ниже установленной.

Различают водонагреватели закрытого (напорного) и открытого (безнапорного) типов.

- Бойлер закрытого типа можно использовать в системе централизованного водоснабжения нескольких водоразборных точек. Нагревательная ёмкость в них изготовлена из металла (эмалированная сталь, нержавеющая сталь, медь). Для того, чтобы избежать повреждения ёмкости из-за повышения давления, возникающего в результате расширения воды при нагреве, вместе с бойлером может применяться бак-экспанзомат (расширительный бак) или группа безопасности, состоящая из предохранительного, сбросного и обратного клапанов, при необходимости также дополняется редуктором давления, манометром, термосмесителем. При повышении давления выше номинального значения предохранительного клапана открывается пружинная задвижка, и лишняя вода стравливается в канализацию. Обратный клапан мешает расширившейся воде, а, значит, обладающей более высоким давлением по сравнению с подающейся холодной водой, уйти обратно в холодную трубу. Группа безопасности размещается на подающем патрубке непосредственно на входе в бойлер.

В стальных баках для предотвращения коррозии применяется катодная защита на основании жертвенного анода, как правило, из магния или цинка, или анода с внешним питанием.

- Бойлер открытого типа может снабжать только одну водоразборную точку и только посредством специальной водоразборной арматуры (спецсмеситель). Основным принципом действия такой арматуры является перекрывание сетевой воды, находящейся под давлением, не на выходе, а на входе в бойлер. Это позволяет изготавливать ёмкость из менее прочных материалов, чаще всего пластмассы. Спецсмеситель также выполняет функцию группы безопасности, стравливая в раковину избыточную воду при расширении во время нагрева. Бойлеры закрытого типа могут использоваться со спецсмесителями, но бойлеры открытого типа с группой безопасности и расширительным баком работать не могут. Понятие «безнапорный» вовсе не означает, что ёмкость можно предварительно заполнить, а затем отключить от источника водоснабжения и расходовать воду до тех пор, пока бак не опустошится. Для того, чтобы водоразбор состоялся, и горячая вода полилась из бака, холодная вода должна подаваться в ёмкость под давлением. При этом сам бак будет полностью заполнен водой в любой момент времени. Если напор на входе отсутствует, вода физически не сможет выйти наружу, так как трубка для выхода горячей воды открывается в самой верхней точке бойлера (несмотря на то, что с внешней стороны водонагревателя штуцер горячей воды может находиться где угодно, даже в днище бака). Холодная вода, напротив, подается снизу, при этом на конце штуцера установлен рассекатель, в результате чего поступающая вода как бы «стелется» по дну ёмкости. Нагревательный элемент также расположен внизу. В результате за счёт естественной конвекции осуществляется постепенное увеличение температуры по высоте ёмкости, и уже нагретая вода не смешивается с холодной. Для случаев, когда постоянная подача воды отсутствует, предусмотрены специальные водонагреватели без теплоизоляции и выходом.

В проточных водонагревателях размер бака сильно уменьшен, так что нагревательная ёмкость представляет собой узкую трубку. Это приводит к быстрому прогреву воды за то время, пока она протекает через нагревательную ёмкость (теплообменник).

В качестве нагревательного элемента могут использоваться ТЭН, неизолированная спираль, газовая горелка и не прямой нагрев (трубка с нагреваемой водой располагается внутри ёмкости с теплоносителем — кожухотрубный теплообменник). Использовать газовые проточные водонагреватели возможно только при наличии дымохода, который заложен при строительстве дома согласно проекту.

Существуют проточные водонагреватели закрытого и открытого типов. Проточники закрытого типа могут снабжать несколько водоразборных точек, при этом расширительный бак и группа безопасности не требуются. Проточники открытого типа могут снабжать горячей водой только одну водоразборную точку с использованием спецсмесителя.

Проточные газовые водонагреватели различают по типу розжига. Основные применяемые — это поджог газа от пьезоэлемента, от электронного блока и от гидротурбины.

Включение нагревательного элемента происходит в момент водоразбора на основании сигналов от датчиков протока (по трубке с нагревательным элементом протекает вода) и температуры (протекающая вода ниже установленной температуры). Выключение нагревательного элемента происходит сразу после окончания водоразбора либо в случае перегрева. Проточные водонагреватели, в отличие от накопительных, позволяют обходиться без смесителей холодной и горячей воды. Электрические проточные водонагреватели обычно имеют несколько ступеней мощности, на каждой ступени температура регулируется расходом воды. Модели с электронным управлением

регулируют мощность нагрева в зависимости от протока и температуры входящей воды, поддерживая постоянной температуру воды на выходе.

## **2. Особенности эксплуатации электрических водонагревателей**

Перед установкой водонагревателя необходимо удостовериться, что заземляющий электрод розетки должным образом заземлен. В случае отсутствия заземляющего электрода в розетке, необходимо заземлить водонагреватель отдельным проводом к выводу заземления на корпусе водонагревателя. При установке водонагревателей нужно также помнить о необходимости в дальнейшем обслуживать прибор, поэтому необходимо оставить достаточно места для этого.

Если вода, подаваемая в проточный водонагреватель, имеет высокую жесткость, то для продления срока службы водонагревателя рекомендуется первоначально умягчить воду. Если возможности умягчать воду нет, то нужно будет время от времени промывать водонагреватели специальными средствами для очищения от накипи. Среди потребителей существует мнение, что водонагреватели можно промывать лимонной кислотой, но производители не рекомендуют применять данное средство. Если очистка от накипи у проточных водонагревателей не будет проводиться регулярно, то это приведет к понижению КПД водонагревателя, а затем может произойти полное зарастание труб накипью и, как результат, выход прибора из строя. Также у электрических проточных водонагревателей большое количество накипи приводит к нагреванию электроподводящего провода, что может привести со временем к его оплавлению и созданию пожароопасной ситуации. Подобная ситуация может возникнуть и в том случае, если занижено сечение электрической подводки. Необходимо точно соблюдать указания фирмы-производителя.

Также проточные водонагреватели чувствительны к шламу и прочим загрязнениям воды, рекомендуется устанавливать механический фильтр.

Во избежание выхода проточного водонагревателя из строя необходимо, чтобы при включении он был заполнен водой.

Также для работы проточного водонагревателя необходим определенный напор в водопроводной сети, не менее 5 мм вод. ст., т.к. при прохождении воды по змеевику происходят большие потери напора на трение.

Накопительные водонагреватели обладают большой массой, поэтому необходимо чтобы они были смонтированы на стене, способной выдержать их вес. Необходимо также предусмотреть спускной кран для слива шлама и установку предохранительного клапана от избыточного давления. Дренажная линия предохранительного клапана должна быть постоянно открытой.

Для накопительных водонагревателей свыше 100 л рекомендована установка расширительного бака. Также на вводе водопроводной холодной воды в водонагреватель нужно устанавливать обратный клапан, чтобы предотвратить обратный ток воды.

Во избежание протечек и выхода из строя оборудования соединительные трубопроводы необходимо монтировать без напряжения, также надо следить за тем, чтобы гибкие шланги не были переломлены или скручены.

Из-за неаккуратно проведенных монтажных работ возможно загрязнение питьевой воды. Монтаж бака-водонагревателя нужно проводить с соблюдением гигиенических норм и правил. Испытание бака-водонагревателя на герметичность производится только питьевой водой. Как для проточного, так и для накопительного водонагревателя рекомендуется также устанавливать регулятор давления во избежание гидравлического удара. Очистку емкостного водонагревателя необходимо производить не менее чем раз в 2 года. Чистка проходит эффективнее, если пустой бак водонагревателя нагреть перед промывкой, а потом промыть струей холодной воды (если данный способ не запрещен

фирмой-производителем). Благодаря эффекту термошока известковые отложения лучше отделяются от гладкотрубного теплообменника.

### **3. Электрокалориферные установки**

Электрокалориферная установка (ЭКУ) предназначена для обогрева помещений промышленного и сельскохозяйственного назначения, также применяется в строительстве для сушки штукатурки, строительных материалов, краски и создания комфортных условий при выполнении работ. Установка при работе создает перепад по температуре входящего и выходящего воздуха от  $+35^{\circ}\text{C}$  до  $+65^{\circ}\text{C}$ , что позволяет использовать его для приточной вентиляции и обогрева в режиме рециркуляции. При необходимости, в теплое время установку можно использовать как высокопроизводительный вентилятор, отключив электрокалорифер; снизить перепад температур входящего и выходящего воздуха за счет отключений секций ЭКУ. Установка используется в закрытых помещениях при температуре окружающей среды от  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $+40^{\circ}\text{C}$ , не содержащей легковоспламеняющихся веществ и пыли. Электрокалориферная установка состоит из электрокалорифера, осевого вентилятора; может устанавливаться на площадку или подвешиваться на кронштейны.

### **4. Электросварочное оборудование для дуговой и контактной сварки**

В зависимости от технологии сварки выделяют следующие виды сварочного оборудования:

- для ручной дуговой сварки – сварочные трансформаторы, агрегаты (генераторы), преобразователи, выпрямители, инверторы;
- для полуавтоматической сварки – сварочные полуавтоматы компактного исполнения, с отдельным механизмом подачи проволоки;
- для автоматической сварки – автоматы, сварочные тракторы;
- для сварки неплавящимся электродом;
- для дуговой сварки универсального типа;
- для газовой сварки;
- для электрошлаковой сварки – автоматы рельсового и безрельсового типов, магнитошагающие, магнитно-гусеничные и магнитно-роликовые автоматы;
- для контактной сварки.

Структура обозначения сварочного оборудования, введенная в СССР

Единая структура обозначения сварочного оборудования, выпускавшегося предприятиями, подведомственными Министерству электротехнической промышленности СССР, сохранилась в основном и к настоящему времени. Однако некоторые производители не придерживаются данной системы, поэтому полного единства в маркировке сварочного оборудования нет.

Согласно этой структуре сварочное оборудование обозначается следующим образом.



Рисунок 2. Единая структура обозначения сварочного оборудования, введенная в СССР

1. Тип изделия: А – автомат или агрегат, В – выпрямитель, П – полуавтомат, Т – трансформатор, У – установка.
2. Способ сварки в зависимости от источника тепла: Д – дуговая сварка, П – плазменная сварка.
3. Способ сварки по виду защиты от воздуха: Г – в защитных газах, Ф – под флюсом, У – универсальный, С – специальные способы сварки. Данное обозначение не используется в марке оборудования для ручной дуговой сварки покрытыми электродами.
4. Дополнительное пояснение: Б – бензиновый агрегат, Д – дизельный агрегат, И – для импульсной сварки, М – многопостовое питание; Э – электронное регулирование тока; М (для ручной дуговой сварки) – механическое регулирование тока.
5. Сила тока в сотнях ампер (одна или две цифры).
6. Порядковый номер разработки модели сварочного оборудования (две цифры).
7. Климатическое исполнение модели: У – умеренный климат, Хл – холодный климат, Т – тропический климат.

Категория помещения, в котором может использоваться оборудование: 1 – открытый воздух; 2 – палатки, прицепы автомобилей; 3 – помещения с естественной вентиляцией; 4 – помещения с принудительной вентиляцией и отоплением; 5 – помещения с повышенной влажностью.

#### 1. 4 Лекция №6 (2 часа).

**Тема:** «Основные сведения. Обработка током»

##### 1.4.1 Вопросы лекции:

1. Электрофизические факторы в природе
2. Технологические свойства и проявления электрического тока
3. Обработка кормовых материалов

##### 1.4.2 Краткое содержание вопросов:

#### 1. Электрофизические факторы в природе

Назначение электрофизических и электрохимических методов обработки. В современном машиностроении все более широко используются жаропрочные, нержавеющие, магнитные и другие труднообрабатываемые стали, а также твердые сплавы, полупроводниковые материалы, рубины, ферриты, кварц и др. Обработка их механическими методами

чрезвычайно затруднена, а иногда и невозможна. В связи с развитием обработки металлов давлением, точного литья, широким использованием пластических масс во много раз увеличилась потребность в штампах, пресс-формах и других изделиях с деталями сложной формы, обработка которых весьма трудоемка и сложна. В некоторых современных машинах и приборах иногда встречаются детали, которые не могут быть обработаны механическими методами (например, отверстия и фасонные прорезы особо малых размеров, соединительные каналы в труднодоступных местах и т. п.). Для обработки труднообрабатываемых материалов, а также деталей сложной формы с успехом используются электрохимические и электрофизические методы размерной обработки. Эти методы основаны на различных физико-химических процессах энергетического воздействия на твердое тело, при котором от него отделяются частицы и получается деталь с заданными размерами и формой.

Основные виды электрофизической и электрохимической обработки. В зависимости от используемых физико-химических процессов эти методы обработки можно подразделить на четыре группы:

1. Электроэрозионные методы обработки токопроводящих материалов (металлов и сплавов), основанные на использовании преобразуемой в тепло энергии электрических разрядов, возбуждаемых между инструментом и заготовкой. Различают четыре основные разновидности электроэрозионной обработки: электроискровую, электроимпульсную, П • грош ••, н , НУ<sup>50</sup> и анодно-механическую.

2. Электрохимическая обработка металлов и сплавов, преобразование электрической энергии в энергию химических ( ВЯ 1ВЙ При этом металл заготовки превращается в легко удаляемые из зоны обработки химические соединения (анодное растворение).

3. Ультразвуковая обработка, основанная на импульсном ударном механическом воздействии на материал с частотой свыше 16 кГц. Этим методом обрабатывают твердые и хрупкие материалы.

4. Лучевые способы обработки, основанные на смене материала заготовки при воздействии на нее концентрированных лучей с высокой плотностью энергии, которая в зоне обработки преобразуется в тепло. К ним относятся обработка сфокусированными световыми, электронными или ионными лучами.

Достоинства и применение электрофизических и электрохимических методов обработки. Электрофизические и электрохимические методы обработки по сравнению с другими методами обладают рядом достоинств

1) этими методами можно обрабатывать различные материалы, обладающие наиболее высокими физико-механическими свойствами, обработка которых другими методами невозможна или весьма затруднительна;

2) благодаря простоте кинематики формообразования можно этими методами вести обработку, которую невозможно осуществить другими способами (глухие фасонные отверстия, полости сложной формы, отверстия с криволинейной осью; отверстия диаметром порядка десятых и сотых долей миллиметра);

3) возможность отображения (копирования) формы инструмента сразу По всей обрабатываемой поверхности заготовки при простом поступательном перемещении инструмента;

4) при обработке практически нет силового воздействия на заготовку;

5) обработку этими методами легко автоматизировать.

Однако имеются факторы, ограничивающие применение электрофизических и электрохимических методов обработки. При механической обработке обычных конструкционных материалов в большинстве случаев производительность и точность



оказываются более высокими, а шероховатость поверхности меньшей. Поэтому электрофизические и электрохимические методы используются преимущественно при обработке труднообрабатываемых материалов и сложных по профилю деталей. Тем не менее они оказывают влияние на развитие ряда отраслей промышленности. Они открывают новые возможности в создании надежных и долговечных машин и аппаратов и в ряде случаев являются единственно возможными методами решения сложных технологических задач.

## **2. Технологические свойства и проявления электрического тока**

Электрический ток - упорядоченное движение заряженных частиц под действием сил электрического поля или сторонних сил. За направление тока выбрано направление движения положительно заряженных частиц. Электрический ток называют постоянным, если сила тока и его направление не меняются с течением времени. Перемещение электронов происходит под влиянием электродвижущей силы тока, которая поддерживает разность потенциалов или так называемое напряжение в различных точках цепи. Электродвижущей силой (э. д. с.) называется работа, затрачиваемая источником электрической энергии на перемещение электронов по замкнутой цепи. Электродвижущая сила и напряжение измеряются в вольтах (в), а сила тока — в амперах (а).

Сопротивление проводника электрическому току зависит от материала проводника и его сечения, а также от длины проводника. Единицей сопротивления является 1 Ом, соответствующий току через проводник в 1 Ампер при напряжении на проводник 1 вольт. Электрические величины выражаются через закон Ома, являющийся основополагающим законом электротехники.

Все компоненты электрической цепи делятся на две группы: пассивные и активные компоненты, по своему отношению к электрическому току. Активными компонентами называются компоненты, которые используют энергию постоянного тока для усиления или генерации сигнала переменного тока. Примерами активных компонентов являются транзистор, вакуумная радиолампа, тиристор. К пассивным относятся элементы, в которых рассеивается (резисторы) или накапливается (катушка индуктивности и конденсаторы) энергия.

## **3. Обработка кормовых материалов**

Тепловая обработка паром проводится с целью улучшения вкусовых и питательных свойств корма, а также уничтожения болезнетворных бактерий.

При тепловой обработке кормов необходимо выдерживать температурный и временный режимы с тем, чтобы корм хорошо пропарился, размягчился и прошёл гарантированную стерилизацию. После обработки корм охлаждают до температуры 40 °С.

Обработанный корм должен быть сразу же скормлен животным, так как он не подлежит длительному хранению. Кроме того, остывший корм плохо поедается животными.

При использовании машин и оборудования для тепловой обработки кормов особое внимание необходимо уделять технике безопасности. Аппаратура водогрейных и паровых котлов должна быть в исправном состоянии, не допускается перегрев воды и пара, работа без защитных и предохранительных устройств.

При тепловой обработке корма энергия расходуется на нагрев корма, аппарата и на тепловой эффект производственного процесса (растворение кристаллов, испарение, поджаривание и др.), а также на покрытие потерь теплоты в окружающую среду.

Для получения пара с целью использования его для тепловой обработки кормов, нагрева воды, обогрева животноводческих помещений, стерилизации молочного

оборудования используют котлы-парообразователи КВ-300М; КВ-300МТ; КТ-500; Д-721А; КЖ-1500 и др.

Котлы-парообразователи КВ-300МТ и КЖ-1500 работают соответственно на твёрдом и жидком топливе.

Котёл-парообразователь КЖ-1500 – жаротрубный, дымогарный, трёхходовый, выполнен на одной раме и имеет блочное исполнение основных сборочных единиц. Он состоит из котла в сборе, блока водоподводки и питания, горелки с топливной аппаратурой, арматуры, дымохода, электрошкафа. Работает котёл на жидком топливе, обслуживается одним человеком.

Современные котлы-парообразователи комплектуют системами автоматизации и контроля их работы, противонакипными магнитными устройствами (для умягчения воды).

Машины и оборудование для тепловой обработки кормов по способу обработки делятся на кормозапарники, запарники-смесители, кормозапарочные агрегаты, варочные котлы и сушильные установки, а по способу выполнения технологического процесса – на аппараты периодического и непрерывного действия.

В хозяйствах корма запаривают в запарочных чанах, цилиндрических ёмкостях и изготовленных из местных материалов ящиках.

Существенный недостаток кормозапарников – неравномерное запаривание корма. Для получения высококачественного и однородного корма, его необходимо запаривать одновременно со смешиванием. Поэтому наибольшее распространение получили запарники-смесители С-2, С-7, С-12, ЗС-6, варочный котёл ВК-1.

Запарник-смеситель кормов С-12 служит для приготовления кормовых смесей влажностью 65...80% из запаренных или сырых кормов, предназначенных для крупного рогатого скота, свиней и птицы.

Рабочий объём запарника-смесителя –  $12 \text{ м}^3$ , что позволяет запаривать и смешивать как сочные корма, так и смеси из грубых стебельчатых кормов. Грубые корма перед запариванием измельчают до частиц размером 50 мм.

При работе смесителя лопасти одного вала перемешивают корм в сторону привода, а лопасти другого – к выгрузной горловине.

Пар подводится к парораспределителю с двух сторон внизу корпуса.

Производительность при механизированной загрузке на приготовлении кормосмесей составляет: с запариванием – 5 т/ч, без запаривания – 10 т/ч. Производительность шнека при выгрузке кормосмесей – до 40 т/ч.

Запарники-смесители С-2, С-7, ВК-1 по конструкции аналогичны запарнику – смесителю С-12. В процессе эксплуатации запарники-смесители обязательно очищают и промывают от остатков кормов, которые удаляются из корпуса запарника самотёком.

Кормозапарочные агрегаты служат для подготовки кормов и кормовых смесей. Они обычно совмещают несколько технологических операций.

Картофелезапарочный агрегат АЗК-3 служит для мойки, измельчения и запаривания картофеля, а также для отделения примесей. Он может использоваться самостоятельно при закладке на силос запарного картофеля или в составе комплектов оборудования кормоцехов для приготовления кормовых смесей на свиноводческих фермах. Производительность при запаривании картофеля составляет 3 т/ч.

Кормоприготовительный агрегат ЗПК-4 используют для мойки, запаривания и разминания картофеля на свиноводческих фермах.

Технологический процесс кормоприготовительного агрегата следующий. Подлежащий обработке картофель подают в мойку 3 (см. схему), где он промывается и шнеком 5 направляется на распределительное устройство 9, равномерно укладывающее картофель по всему сечению запарочного чана 10. Пар подаётся через паровой коллектор 11. Запаренный картофель выгрузным шнеком 15 продавливается через ножи 14 и

поступает к мяльному шнеку 13, который измельчает и выгружает приготовленную массу.

Агрегат работает с ковшом-транспортёром ТК-3 для подачи картофеля и парообразователем типа КВ-300М.

Производительность запарника 1000 кг/ч, мощность электродвигателя 4,4 кВт.

### **1. 5 Лекция №7 (2 часа).**

**Тема:** «Электроимпульсная и ультразвуковая технологии»

#### **1.5.1 Вопросы лекции:**

1. Электроимпульсная технология
2. Ультразвуковая технология
3. Применение магнитных полей

#### **1.5.2 Краткое содержание вопросов:**

##### **1. Электроимпульсная технология**

Электроимпульсная обработка (ЭИО) –вид электроэрозионной обработки, основанный на использовании импульсов дугового разряда для разрушения слоя металла

Преимущества электроимпульсной обработки.

Выделяют следующие достоинства ЭИО:

- способность обрабатывать любые токопроводящие металлы и сплавы, независимо от их физических свойств;
- высокая точность и небольшая шероховатость обрабатываемой поверхности;
- возможность обрабатывать сложные поверхности (угловое, двухконтурное резание);
- отсутствие нежелательного нагрева детали в процессе обработки.

Преимущества электроимпульсной обработки определяют область применения его на практике. Этот специальный метод используется в таких случаях, если применение других технологий ведет к понижению качества, уменьшению производительности, увеличению стоимости или когда альтернативы вовсе нет, то есть если возможно изготовить деталь только электроимпульсной обработкой.

Область применения электроимпульсной обработки металлов.

Стоит отметить, что ЭЭО не исключает механическую и другие виды обработки, а лишь дополняет, но стоит отметить, что в некоторых случаях обойтись без ЭИО невозможно.

Приведем примеры деталей, обрабатываемых электроимпульсным методом, и объясним, чем обусловлено применение ЭИО.

Электроэрозионная обработка, как и электроимпульсная, являющаяся ее разновидностью, относится к нетрадиционным технологиям, так как не имеет широкого распространения.

Таблица 2 – Детали, обрабатываемые электроимпульсным методом.

Деталь	Назначение	Конструктивная особенность	Требования к детали
Детали экструзионных головок для обработки металлов.			

Матрица	Формирование внешнего контура при образовании профиля методом экструзии.	Отверстия малого диаметра с криволинейными контурами, узкие щели сложной конфигурации.	Высокая твердость, износостойкость и точность. Устойчивость к воздействию высоких давлений и температур.
Рассекатель	Получение внутренних контуров в полых профилях.	Тонкие и глубокие канавки простой и сложной формы, полости сложной конфигурации.	Высокая твердость, износостойкость и точность. Устойчивость к воздействию высоких давлений и температур.
Детали штампов.			
Пуансон	Оказывает давление на обрабатываемый материал при штамповке.	Сложная геометрическая форма, обусловленная конфигурацией изделия. Наличие пазов и лысок глубиной от 0,15 мм.	Высокая твердость. Стойкость на изгиб и сжатие. [5]
Матрица	Формообразование наружной поверхности изделия.	Сложная геометрическая форма, обусловленная конфигурацией изделия.	Высокая твердость, точность. Стойкость на изгиб, разрыв и срез.

В машиностроении и инструментальном производстве электроэрозионные станки почти, или вовсе незаменимы. При изготовлении некоторых изделий как матрицы, штампы для прессов, обработке отверстий малых диаметров и узких каналов использование уступающих в универсальности фрезерной обработки (невозможно обрабатывать тонкими фрезами на большую глубину) и литья (не обеспечивается необходимая твердость и шероховатость поверхности) нецелесообразно.

## 2. Ультразвуковая технология

Ультразвуковой метод обработки относится к электрофизическому воздействию на материал. Частота воздействий соответствует диапазону неслышимых человеческим ухом звуков (частота 16–105 кГц). При распространении в материальной среде ультразвуковая волна переносит определенную энергию, которая может непосредственно использоваться в технологических процессах или же преобразовываться в другие виды энергии (тепловую, химическую, механическую).

В качестве источников ультразвуковых колебаний используют аэродинамические, механические, гидродинамические, электромагнитные, электродинамические, магнитострикционные и пьезоэлектрические излучатели.

Основным элементом излучателя является электроакустический преобразователь (магнитострикционный или пьезоэлектрический). Он соединен с согласующим устройством, осуществляющим передачу акустической энергии от преобразователя в обрабатываемую среду, а также создающим размеры излучающей поверхности и интенсивность ультразвукового поля.

В качестве согласующих устройств используют, как правило, волноводные концентраторы акустические – расширяющиеся (для жидкостей) или сужающиеся (для

твердых веществ), резонансные (настроены на определенную частоту) или нерезонансные пластины.

Согласующее устройство, кроме того, может одновременно выполнять функции режущего или какого-либо другого инструмента (например, при сверлении, сварке, пайке). Иногда применяют преобразователи, работающие без согласующего устройства (например, кольцевые преобразователи, встроенные в трубопровод).

Ультразвуковая обработка твердых веществ используется в основном для сварки металлов, пластмасс и синтетических тканей, при резании металлов, стекла, керамики, алмаза и т.п. (например, при сверлении, точении, гравировании), а также при обработке металлов давлением (волочении, штамповке, прессовании и др.).

Резание на ультразвуковых станках обеспечивает высокую точность, позволяет получать не только прямые круглые отверстия, но и вырезы сложных сечений, криволинейные каналы. Ультразвук, подведенный к инструменту обычного металлорежущего станка (например, сверлу, резцу), интенсифицирует обработку и улучшает дробление стружки.

### 3 Применение магнитных полей

Сепараторы с постоянным магнитным полем

Наиболее просты в устройстве и экономичны сепараторы с постоянными магнитами, так как они не требуют дополнительной энергии для питания обмоток. Их используют, например, на хлебозаводах для очистки муки от ферропримесей. Суммарная подъемная сила магнитов в этих сепараторах, как правило, должна быть не менее 120 Н. В магнитном поле мука должна передвигаться тонким слоем, толщиной порядка 6—8 мм, со скоростью не более 0,5 м/с.

Сепараторы с постоянными магнитами имеют и существенные недостатки: подъемная сила их невелика и ослабевает со временем из-за «старения» магнитов. Сепараторы с электромагнитами не имеют этих недостатков, так как электромагниты, устанавливаемые в них, питаются постоянным током. Подъемная сила их значительно выше и может регулироваться током обмоток.

На рис. 2 представлена схема электромагнитного сепаратора для сыпучих примесей. Сепарируемый материал подается в приемный бункер 1 и по транспортеру 2 движется к приводному барабану 3, изготовленному из немагнитного материала (латунь и т. п.). Барабан 3 вращается вокруг неподвижного электромагнита постоянного тока 4.

Центробежная сила отбрасывает материал в разгрузочное отверстие 5, а ферропримеси под действием магнитного поля электромагнита 4 «прилипают» к ленте транспортера и отрываются от нее лишь после выхода из поля действия магнитов, попадая в разгрузочное отверстие для ферропримесей 6. Чем тоньше слой продукта на ленте транспортера, тем лучше осуществляется сепарация.

Магнитные поля можно использовать для разделения заряженных частиц в дисперсных системах. В основе этого разделения лежат силы Лоренца

$$F_{\text{л}} = k \cdot q \cdot v \cdot H \cdot \sin \alpha$$

где  $F_{\text{л}}$  — сила, воздействующая на заряженную частицу, Н,  $k$  коэффициент пропорциональности,  $q$  — заряд частицы, Кл,  $v$  — скорость частицы, м/с,  $H$  — напряженность магнитного поля, А/м,  $\alpha$  — угол между векторами поля и скорости.

Положительно и отрицательно заряженные частицы, ионы под действием сил Лоренца отклоняются в противоположные стороны, кроме этого частицы с разными скоростями также сортируются в магнитном поле в соответствии с величинами их скоростей.

Устройства для омагничивания воды

Многочисленные исследования, проведенные в последние годы, показали возможность эффективного применения магнитной обработки водных систем — технической и природной вод, растворов и суспензий.

При магнитной обработке водных систем происходит:

- ускорение коагуляции — слипание взвешенных в воде твердых частиц,
- образование и усиление адсорбции,
- образование кристаллов солей при выпаривании не на стенках сосуда, а в объеме,
- ускорение растворения твердых тел,
- изменение смачиваемости твердых поверхностей,
- изменение концентрации растворенных газов.

Так как вода является активным участником всех биологических и подавляющего большинства технологических процессов, изменение ее свойств под действием магнитного поля с успехом используют в пищевой технологии, в медицине, химии, биохимии, а также в сельском хозяйстве.

С помощью локальной концентрации веществ в жидкости можно добиться:

- опреснения и улучшения качества природной и технологических вод,
- очистки жидкостей от взвешенных примесей,
- управления активностью питательных физиологических и фармакологических растворов,
- управления процессами селективного роста микроорганизмов (ускорение или угнетение скоростей роста и деления бактерий, дрожжей),
- управления процессами бактериального выщелачивания сточных вод,
- магнитной анестезиологии.

Управление свойствами коллоидных систем, процессов растворения и кристаллизации служит для:

- повышения эффективности процессов сгущения и фильтрации,
- уменьшения отложений солей, накипи и других инкрустаций,
- улучшение роста растений, повышение их урожайности, всхожести.

Отметим особенности магнитной обработки воды:

1. Магнитная обработка требует обязательного протекания воды с некоторой скоростью сквозь одно или несколько магнитных полей.

2. Эффект омагничивания не сохраняется вечно, а исчезает через некоторое время после окончания действия магнитного поля, измеряемое часами или сутками.

3. Эффект обработки зависит от индукции магнитного поля и ее градиента, скорости потока, состава водной системы и времени ее нахождения в поле. Отмечено, что между эффектом обработки и величиной напряженности магнитного поля прямой пропорциональности нет. Важную роль играет градиент магнитного поля. Это понятно, если учесть, что сила  $F$ , действующая на вещество со стороны неоднородного магнитного поля, определяется выражением

$$F = \chi \cdot H \cdot \frac{dH}{dx}$$

где  $\chi$  — магнитная восприимчивость единицы объема вещества,  $H$  — напряженность магнитного поля, А/м,  $dH/dx$  — градиент напряженности

Как правило, значения индукции магнитного поля лежат в пределах 0,2—1,0 Тл, а градиента — 50,00—200,00 Тл/м.

Наилучшие результаты магнитной обработки достигаются при скорости течения воды в поле, равной 1—3 м/с.

О влиянии природы и концентрации веществ, растворенных в воде, известно пока мало. Установлено, что эффект омагничивания зависит от типа и количества солевых примесей в воде.

Приведем несколько конструкций установок для магнитной обработки водных систем с постоянными магнитами и электромагнитами, питаемыми током различной частоты.

Большое распространение получили аппараты, оснащенные электромагнитами.

Магнитные поля оказывают влияние также на развитие жизнедеятельности микроорганизмов. Магнитобиология — развивающаяся область науки, находит все большее практическое применение, в том числе и в биотехнологических процессах пищевых производств. Выявлено влияние постоянных, переменных и пульсирующих магнитных полей на размножение, морфолого-культуральные свойства, метаболизм, ферментативную активность и другие стороны жизнедеятельности микроорганизмов.

Воздействие на микроорганизмы магнитных полей независимо от их физических параметров приводит к фенотипической изменчивости морфолого-культуральных и биохимических свойств. У некоторых видов в результате обработки может изменяться химический состав, антигенная структура, вирулентность, резистентность к антибиотикам, фагам, УФ-облучению. Иногда магнитные поля вызывают прямые мутации, но чаще всего они влияют на экстрахромосомные генетические структуры.

Общепризнанной теории, объясняющей механизм магнитного поля на клетку, пока не существует. Вероятно, в основе биологического действия магнитных полей на микроорганизмы лежит общий механизм опосредованного влияния через экологический фактор.

## **1. 6 Лекция №8 (2 часа).**

**Тема:** «Проектирование электротехнологических установок и оборудования»

### **1.6.1 Вопросы лекции:**

1. Задачи проектирования электротехнологических установок
2. Системный подход при выборе технологических решений, учет энергетических и социальных аспектов
3. Техничко-экономическая оптимизация технологических решений

### **1.6.2 Краткое содержание вопросов:**

#### **1. Задачи проектирования электротехнологических установок**

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

Задача такого проектирования — создание действующей ЭТУ, которая обеспечивает технологический процесс с максимальным использованием своих возможностей и минимальными приведёнными затратами, создаёт условия для наибольшей производительности труда обслуживающего персонала, соответствует правилам техники электробезопасности, правилам устройства и эксплуатации электроустановок.

Приступая к проектированию 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 поверочный и конструктивный (проектный или полный) расчёт электротермических установок.

Поверочный расчёт выполняют для определения паспортных данных электротермической установки при их отсутствии или для установления возможности использования готовой установки в конкретных, отличающихся от паспортных, условиях эксплуатации.

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

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

## **2. Системный подход при выборе технологических решений, учет энергетических и социальных аспектов**

Существуют различные точки зрения на содержание понятия «системный анализ» и область его применения. Изучение различных определений системного анализа позволяет выделить четыре его трактовки.

Итак, системный анализ — это совокупность определенных научных методов и практических приемов решения разнообразных проблем, возникающих во всех сферах целенаправленной деятельности общества, на основе системного подхода и представления объекта исследования в виде системы. Характерным для системного анализа является то, что поиск лучшего решения проблемы начинается с определения и упорядочения целей деятельности системы, при функционировании которой возникла данная проблема. При этом устанавливается соответствие между этими целями, возможными путями решения возникшей проблемы и потребными для этого ресурсами.

Системный анализ характеризуется главным образом упорядоченным, логически обоснованным подходом к исследованию проблем и использованию существующих методов их решения, которые могут быть разработаны в рамках других наук.

Целью системного анализа является полная и всесторонняя проверка различных вариантов действий с точки зрения количественного и качественного сопоставления затраченных ресурсов с получаемым эффектом.

Системный анализ, по существу, является средством установления рамок для систематизированного и более эффективного использования знаний, суждений и интуиции специалистов; он обязывает к определенной дисциплине мышления.

Иными словами, системный анализ — это систематизированные методы оказания лицу, принимающему решение, помощи при выборе курса действий путем изучения всей проблемы в целом, определения конечных целей и различных путей их достижения с



учетом возможных последствий. Для получения квалифицированного суждения по проблемам используются соответствующие методы, по возможности аналитические.

Системный анализ предназначен для решения в первую очередь слабоструктуризованных проблем, т.е. проблем, состав элементов и взаимосвязей которых установлен только частично, задач, возникающих, как правило, в ситуациях, характеризующихся наличием фактора неопределенности и содержащих неформализуемые элементы, неперебиваемые на язык математики.

Одна из задач системного анализа заключается в раскрытии содержания проблем, стоящих перед руководителями, принимающими решения, настолько, чтобы им стали очевидны все основные последствия решений и их можно было бы учитывать в своих действиях. Системный анализ помогает ответственному за принятие решения лицу более строго подойти к оценке возможных вариантов действий и выбрать наилучший из них с учетом дополнительных, неформализуемых факторов и моментов, которые могут быть неизвестны специалистам, готовящим решение.

Кратко охарактеризуем методологию системного анализа, используя определение методологии науки.

«Методология науки дает характеристику компонентов научного исследования, его объекта, предмета анализа, задачи исследования (или проблемы), совокупности исследовательских средств, необходимых для решения задачи данного типа, а также формирует представление о последовательности движения исследования в процессе решения задач».

Вначале определим содержание объекта системного анализа, т.е. выясним его специфику и место среди других родственных ему научных направлений.

Объект системного анализа в теоретическом аспекте — это процесс подготовки и принятия решений; в прикладном аспекте — различные конкретные проблемы, возникающие при создании и функционировании систем.

В теоретическом аспекте — это, во-первых, общие закономерности проведения исследований, направленные на поиск наилучших решений различных проблем на основе системного подхода (содержание отдельных этапов системного анализа, взаимосвязи, существующие между ними, и др.).

Во-вторых, конкретные научные методы исследования — определение целей и их ранжирование, дезагрегирование проблем (систем) на их составные элементы, определение взаимосвязей, существующих как между элементами системы, так и между системой и внешней средой и др.

В-третьих, принципы интегрирования различных методов и приемов исследования (математических и эвристических), разработанных как в рамках системного анализа, так и в рамках других научных направлений и дисциплин в стройную, взаимообусловленную совокупность методов системного анализа.

В прикладном плане системный анализ вырабатывает рекомендации по созданию принципиально новых или усовершенствованных систем.

Рекомендации по улучшению функционирования существующих систем касаются самых различных проблем, в частности ликвидации нежелательных ситуаций (например, ухудшение финансово-экономического положения предприятия), вызванных изменением как внешних по отношению к изучаемой системе факторов, так и внутренних.

Следует отметить, что объект системного анализа является в то же время объектом целого ряда других научных дисциплин, как общетеоретических, так и прикладных. Например, проблемами составления сбалансированного плана занимается планирование. Однако разработке такого плана в существенной мере будет способствовать использование принципов и методов, которые для решения любых проблем разрабатываются в рамках системного анализа.

Мы считаем, что выделить предмет системного анализа, т. е. отнести системный анализ к категории наук, не представляется возможным, поскольку решением указанных выше проблем занимается целый ряд наук и других научных направлений. (О некоторых из них речь пойдет ниже.)

В отличие от многих наук, главной целью которых является открытие и формулирование объективных законов и закономерностей, присущих предмету изучения, системный анализ в основном направлен на выработку конкретных рекомендаций, в том числе и на основе использования достижений теоретических наук в прикладных целях.

## 2 Техничко-экономическая оптимизация технологических решений

Оптимизация организационно-технологических решений производства СМР преследует цель выбора варианта, при котором с учетом местных условий обеспечивается максимальное сокращение сроков выполнения работ при эффективном использовании материально-технических ресурсов.

Рисунок 3. Логическая схема оптимизации организационно-технических решений.



Оптимальность решений выявляется на основе вариантного проектирования и всестороннего анализа сравниваемых вариантов. Суть оптимизационного поиска заключается в разделении процесса проектирования на этапы. Это позволяет на каждом этапе анализировать организационно-технологические связи между отдельными элементами и производить сравнение этапных вариантов между собой или с базисным (аналоговым) вариантом.

Логическая схема оптимизации организационно-технологических решений приведена на рис. 3. По схеме в каждом блоке выполняется ряд последовательных расчетных и логических операций, содержание которых состоит в следующем.

В блоке A1 концентрируют сведения о видах и методах проведения реконструкции предприятия, состоянии конструкций зданий и сооружений, проектно-технологической документации по объемно-планировочным и конструктивным решениям, объемах реконструктивных работ, условиях их производства, а также ограничениях, связанных с деятельностью предприятия.

Объем необходимых исходных материалов и методика их сбора подробно изложены в.

В блоке A2 производят анализ исходных данных и проектно-технологической документации на реконструкцию объекта; уточняют номенклатуру возможных к применению в данных условиях средств механизации; возможности применения различных методов производства работ, технологическую последовательность их выполнения; возможности концентрации материально-технических и трудовых ресурсов, методы интенсификации производства отдельных видов и комплексов работ.

Важной оценкой вариантов организационно-технических решений является обоснование и выбор критерия оптимальности, рассматриваемого в блоке A3. В качестве такого критерия могут использоваться минимальные сроки производства СМР на объекте реконструкции, минимальные трудозатраты, минимум приведенных затрат. Наряду с выбранным критерием оптимальности необходимо использовать также другие

показатели, характеризующие эффективность строительно-монтажных работ. К таким показателям относят: время остановки основного производства предприятия, уровень концентрации и использования материально-технических и трудовых ресурсов. Выбор того или иного критерия оптимальности зависит от конкретных условий производства работ, объемов и плановых сроков проведения реконструкции.

Операции, выполняемые в блоке Р4, сводятся к разработке (выбору) возможных вариантов организационно-технологических решений с учетом стесненности рабочих зон и других ограничений, обусловленных деятельностью реконструируемого предприятия. При этом обосновывают и определяют размеры монтажно-демонтажных участков, последовательность их включения в производство реконструктивных работ, методы производства ведущих строительных процессов, выбирают по техническим параметрам машины и механизмы, определяют их эксплуатационную производительность, степень совмещения и интенсивность выполнения СМР.

Наряду с этим обосновывают схемы производства работ, определяют трудозатраты, затраты машинного времени, производят расчет и формирование звеньев и бригад рабочих.

При разработке вариантов организационно-технологических решений составляют принципиальные схемы производства работ. Эти схемы отражают основные методы выполнения процессов, расположение машин и механизмов, порядок их перемещения по объекту реконструкции. Для разработки схем используются типовые технологические карты и карты трудовых процессов. При невозможности их привязки к местным условиям производства работ осуществляется их разработка. Составленные схемы и принятые в них организационно-технологические решения являются основой для расчета технико-экономических показателей рассматриваемого варианта.

В блоке Р2 выполняются операции по технико-экономической оценке каждого варианта решений по методам и средствам механизации СМР, использованию материально-технических и трудовых ресурсов, срокам производства работ. За основу при сравнении вариантов принимается показатель, принятый в блоке Аз в качестве основного критерия оптимальности. В связи с тем что объемы, структура и трудоемкость работ на различных реконструируемых объектах будут различны, при окончательном выборе варианта (блок Р3) в первую очередь необходимо принимать такие решения, которые обеспечат сокращение продолжительности реконструктивных работ при минимальных затратах материально-технических и трудовых ресурсов. При этом необходимо также учитывать обеспечение выпуска продукции предприятием в установленных объемах.

По окончательному варианту рассчитываются необходимые технико-экономические показатели (блок Р4).

## **2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

### **ПО ПРОВЕДЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ**

#### **2.1 Практическое занятие №1 (2 часа).**

**Тема:** «Расчёт электродных нагревательных устройств»

##### **2.1.1 Задание для работы:**

1. Определение потребной мощности
2. Определение конструктивных параметров электродной системы

##### **2.1.2 Краткое описание проводимого занятия:**

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  $c (Дж/кг \cdot ^\circ C)$ , плотность материала  $\delta (кг/м^3)$ , удельное электрическое сопротивление  $\rho (Ом \cdot м)$ , время нагрева  $\tau (с)$ , начальная  $t_1$  и конечная  $t_2$  температуры ( $^\circ C$ ), термический к.п.д.  $\eta_m$ .

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

И тогда:

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

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.

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

$$P_{номр} = \frac{P_1 + P_2}{2}.$$

При использовании нагревателей в виде двух плоскопараллельных пластин, размещённых в ёмкости из электроизоляционного материала (при  $j < j_{дон}$ ) рабочая площадь,  $см^2$ , 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  $\rho_2$  - удельное электрическое сопротивление материала при  $t_2$ , Ом·см.

Определяют действительную напряжённость электрического поля  $E$  (3.24) и сравнивают с её допустимым значением  $E_{дон}$ , при этом должно выполняться условие

Мощность  $P_2$  определяется как  $S = \pi \cdot d_2 \cdot h$ .

Для цилиндрических коаксиальных электродов по выражению (3.34) 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:

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

Межэлектродное расстояние:

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

При расчёте однофазных нагревателей непрерывного действия:

$$P_{расч} = P_{номр}.$$

Для трёхфазных:

$$P_{расч} = \frac{1}{3} P_{номр}$$

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

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

где

$$t_{ср} = \frac{t_1 + t_2}{2}.$$

### 2.1.3 Результаты и выводы:

Результаты расчетов сравнивают с заданными данными и оценивают качество проведённых вычислений.

## 2.2 Практическое занятие № 2,3 (4 часа),

Тема: «Электрический и конструктивный расчёты нагревательных элементов»

### 2.2.1 Задание для работы:

1. Определение электрических и тепловых параметров нагревателей

### 2.2.2 Краткое описание проводимого занятия:

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

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

$$P_H = \frac{U_H^2}{R_H} = \frac{U_H^2 \cdot S}{\rho \cdot l},$$

Удельная поверхностная мощность определяется:

$$P_{удт} = \lambda \cdot (t_2 - t_1) / l$$

$$P_{удк} = \alpha_k \cdot (t_2 - t_1)$$

$$P_{уди} = \omega_i \cdot \alpha_i$$

Для нагревателей круглого сечения поперечный периметр нагревателя и площадь поперечного сечения нагревателя можно определить по формулам:

$$\Pi = d \cdot \pi \quad S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

Подставив выражения, можно определить диаметр нагревателя круглого сечения:

$$d = \sqrt[3]{\frac{4P_H^2 \cdot \rho}{\pi^2 \cdot U^2 \cdot P_{уд}}}$$

По расчётному значению диаметра  $d$  подбирают ближайший, больший стандартный диаметр проволоки нагревателя. Длина же выбранного провода определяется по формуле:

$$l = \frac{R \cdot S}{\rho} = \sqrt[3]{\frac{P_H \cdot U^2}{4\pi \cdot \rho \cdot P_{уд}^2}}$$

Для ленточного нагревателя, у которого площадь поперечного

сечения и поперечный периметр равны:

$$S = a \cdot b; \quad \Pi = 2 \cdot (a + b) = 2 \cdot (m + 1) \cdot a ,$$

где  $m = b/a$ ;  $a$  – толщина ленты;  $b$  – ширина ленты.

Расчётная толщина нагревателя прямоугольного сечения:

$$a = \sqrt[3]{\frac{P_n^2 \cdot \rho}{2U^2 \cdot m \cdot (1 + m) P_{y0}}} .$$

По найденному значению толщины ленты  $a$  подбирают стандартную ленту длиной:

$$l = \frac{R \cdot S}{\rho} = \sqrt[3]{\frac{P_n \cdot U^2 \cdot m}{4(m + 1)^2 \rho \cdot P_{y0}^2}} .$$

При рабочей температуре  $t_{раб} > 700^\circ C$  рекомендуется применять для открытых нагревательных элементов проволоку диаметром  $d > 5 \text{ мм}$  и ленту толщиной  $a > 1,5 \text{ мм}$ , так как малое сечение из-за окисления материала приводит к значительному сокращению срока службы нагревателей.

Основные параметры можно рассчитать упрощённо с использованием таблиц по значениям рабочего тока и расчётной температуре. Температуру рабочей поверхности нагревателя  $t_{раб}$  принимают такой, чтобы она была больше технологически необходимой температуры материала.

Для расчёта открытого нагревателя круглого сечения используют следующие выражения:

$$I = \frac{P}{U} .$$

$$t_{раб} = t_{расч} .$$

По  $t_{расч}$  и  $I_{раб}$  по таблице 3.1 определяют  $S$  сечение ( $\text{мм}^2$ ) и диаметр  $d$  ( $\text{мм}$ ) проволоки.

Нагревательный провод может быть намотан в виде спирали или уложен равномерно на керамический каркас и защищён пластинами из жаропрочного электроизоляционного материала или металла, что повышает температуру элементов. Чтобы выбрать сечение нагревателя по таблице 3.1, находят расчётную температуру по формуле:

$$t_{расч} = t_{раб} \cdot k_{монтажа} \cdot k_{среды} ,$$

где  $k_M$  – коэффициент монтажа, учитывающий ухудшение условий охлаждения нагревателя из-за его конструктивного исполнения;  $k_C$  – коэффициент среды,



учитывающий улучшение фактических условий охлаждения нагревателя по сравнению с неподвижной воздушной средой.

Таблица 1 Допустимые нагрузки на нихромовую неизолированную проволоку, подвешенную горизонтально в спокойном воздухе при 20 °С

Диаметр проволоки, мм	Сечение, мм <sup>2</sup>	Сила тока, А, при расчётной температуре, °С						
		200	400	600	700	800	900	1000
0,1	0,00785	0,10	0,47	0,63	0,72	0,80	0,90	1,00
0,2	0,03140	0,65	1,03	1,40	1,65	1,82	2,00	2,30
0,3	0,08500	1,05	1,63	2,27	2,70	3,05	3,40	3,85
0,4	0,12600	1,50	2,34	3,30	3,85	4,40	5,00	5,70
0,5	0,19500	2,00	3,15	4,50	5,20	5,90	6,75	7,70
0,6	0,34200	2,52	4,00	5,70	6,50	7,50	8,50	9,70
0,7	0,38500	3,10	4,80	9,95	7,80	9,10	10,30	11,80
0,8	0,50300	3,70	5,70	8,15	9,15	10,80	12,30	14,00
0,9	0,63600	4,25	6,70	9,35	10,45	12,30	14,50	16,50
1,0	0,78500	4,85	7,70	10,80	12,10	14,30	16,80	19,20
1,1	0,95000	5,40	8,70	12,40	13,90	16,50	19,10	21,50
1,2	1,13000	6,00	9,80	14,00	15,80	18,70	21,60	24,30
1,3	1,33000	6,60	10,90	15,60	17,80	21,00	24,40	27,00
1,4	1,54000	7,25	12,00	17,40	20,00	23,30	27,00	30,00
1,5	1,77000	7,90	13,20	19,20	22,40	25,70	30,00	33,00
1,6	2,01000	8,60	14,40	21,00	24,50	28,00	32,90	36,00
1,8	2,54000	10,00	16,90	24,90	29,00	33,10	39,00	43,20
2,0	3,14000	11,70	19,60	28,70	33,80	39,50	47,00	51,00
2,5	4,91000	16,60	27,50	40,00	46,60	57,50	66,50	73,00
3,0	7,07000	22,30	37,50	54,50	64,00	77,00	88,00	102,00
4,0	12,6000	37,00	60,00	80,00	93,00	110,00	129,00	151,00
5,0	19,6000	52,00	83,00	105,00	124,00	146,00	173,00	206,00

Для нагревательного элемента из проволоки, свитой в спираль,  $k_M=0,8...0,9$ ; свитой в спираль на керамическом основании –  $k_M=0,6...0,7$ ; для проволоки нагревательных плиток и некоторых трубчатых водонагревателей –  $k_M=0,5...0,6$ ; для проволоки лабораторных печей, электронагревателей пола и почв –  $k_M=0,3...0,4$ . Меньшее значение  $k_M$  соответствуют проволоочным нагревателям меньшего диаметра, большие – большего диаметра.

При работе в условиях, отличающихся от свободной конвекции, принимают  $k_C=0,6...0,7$  – для нагревателей элементов в воздушном потоке;  $k_C=2,5$  – в неподвижной воде;  $k_C=3,0...3,5$  – в потоке воды.

Температура рабочей поверхности нагревателя должна удовлетворять условию:

$$t_{\text{раб}} = \frac{t_{\text{расч}}}{k_M k_C} \leq t_{\text{max}}, \quad (3.61)$$

где  $t_{\text{max}}$  – максимально допустимая температура нагревательного элемента.

Длину провода определяют по выражению:

$$l = \frac{U^2 \cdot d^2 \cdot \pi}{4 \cdot P_n \cdot \rho} \quad (3.62)$$

где  $d$  – диаметр проволоки нагревателя, м;  $\rho$  – удельное сопротивление материала нагревателя при действительной температуре, Ом·м.

**2.2.3 Результаты и выводы:** Результаты расчетов сравнивают с заданными данными и оценивают качество проведенных вычислений.

### 2.3 Практическое занятие № 4,5 (4 часа).

**Тема:** «Расчет нагревательных элементов печей сопротивления»

#### 2.3.1 Задание для работы:

1. Основные электрические величины:  $I_n$ ,  $I_\phi$ ,  $R_n$ ,  $R_\phi$ ,  $P_\phi$ .
2. Параметры нагревательного элемента  $d$ ,  $W$ ,  $L_\phi$ ,  $R_\phi$ ,  $W_\phi$ .
3. Массу и способ укладки нагревательного элемента в печи.
4. Отношение ширины к толщине нагревательного элемента  $m$

#### 2.3.2 Краткое описание проводимого занятия:

**Исходные данные:**

$$P_n = 17 \text{ кВт}$$

$$U_n = 380 \text{ В}$$

$$t_p = 800^\circ \text{ С}$$

**Размеры (внутренние) печи:**

Ширина 0,8 м .

Высота 0,6 м

**Решение:**

1. Определение основных электрических величин;

а) определение линейных и фазных токов нагрузок по формулам:

$$I_n = P_n / U_n, \text{ А}$$

$$I_\phi = P_\phi / U_\phi, \text{ А}$$

$$R_n = U_n^2 / P_n, \text{ Ом}$$

$$P_\phi = U_\phi^2 / R_\phi, \text{ Ом, где } P_\phi = P_n / 3, \text{ кВт}$$

где  $P_n$  - номинальная мощность печи, кВт;

$U_n$  - напряжение линейное, В;

$U_\phi$  - напряжение фазное, В.

б) По справочным данным выбираем нагревательный элемент круглого сечения с удельным сопротивлением  $\rho_{20}$ , Ом · м;

поправочный коэффициент электрического сопротивления  $\alpha$  при  $t_p$ , °С .

2. Определение параметров нагревательных элементов.

2.1 Выбор формы (ленточный или проволочный) производится в зависимости от мощности печи по справочным данным.

Диаметр круглого сечения (в виде спирали или зигзага)

$$d = \sqrt[3]{\frac{4P_\phi^3 \cdot \rho_{гор}}{\rho^2 \cdot U_\phi^2 \cdot W_\phi}}$$

где  $\rho_{гор}$  - удельное электрическое сопротивление материала в горячем состоянии, Ом·м;

$W_\phi$  - допустимая удельная поверхностная мощность нагревателя, Вт/м<sup>2</sup>

$P_\phi$  - мощность на фазу, Вт.

$\rho_{гор} = \rho_{20} \cdot \alpha$ , Ом·м

где  $\alpha$  - поправочный коэффициент электрического сопротивления при 800°С  $\alpha = 1,089$

$\rho_{20} = 1,12$  мкОм·м (3) т. 8-25 для нихромного сплава Х15Н60-Н.

$W_\phi = \epsilon_{np} \cdot W_s \cdot \alpha_{эф}$

где  $\alpha_{эф} = 0,68$

$W_s = 0,58$  Вт/см<sup>2</sup>

$$\epsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\rho_H} + \frac{1}{\rho_{ИЗД}} - 1}$$

Выбираем по справочным данным Х15Н60-Н  $\alpha = 1,4$  мм стержень круглого сечения.

2. Определение длины нагревательного элемента.

$$L_\phi = \frac{R \rho^2}{4 \rho_{гор}} = \frac{\rho \cdot U_{cp}^2 \cdot d^2}{4 P_\phi \cdot \rho_{гор}} :$$

где  $R$  – сопротивление нагревательного элемента.

2.5 Определение сопротивления нагревательного элемента.

$$R_\phi = \rho L_\phi / S, \text{ Ом}$$

где  $S = F = \pi d^2 / 4$ , мм<sup>2</sup>

3. Определение удельной поверхностной мощности нагревательного элемента и теплоизоляционных материалов и их выбор.

а) Расчет удельной поверхностной мощности идеального нагревателя и нагреваемого изделия.

$$W_{ид} = \epsilon_{np} W_s, \text{ Вт/см}^2; W_s, \text{ Вт/см}^2$$

где  $\epsilon_{np}$  - приведенный коэффициент теплового излучения.

$W_s$  - удельная поверхностная мощность при теплообмене двух абсолютно черных тел, по рис. 45-9.

б) Определение типа применяемых тепло-изоляционных материалов и их монтаж выполняется руководствуясь по (3) Г. 1-3, Г.2-1, 2-7.

в) Расчет сечения токоведущих токопроводов и пускорегулирующих устройств выполняется по (5, 6, 7).

3. Длина ленты (или стержня) на фазоветвь.

$$L_{\phi} = \frac{RS}{\rho} = \frac{U_{cp}^2 m a^2}{P_{\phi} \rho_{гор}}$$

Таблица №2 Задания для расчета и выбора нагревательных элементов печи сопротивления

Наименование данных	Задания												
	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37
Мощность печи, $P_n$ , кВт	21,6	1,8	1,65	1,55	1,7	5,5	9,3	13,1	10,9	8,6	7,7	27,5	13,5
^ Напряжение питающей сети, $U_n$ , В	220	380	220	380	220	380	380	660	380	660	380	660	380
^ Рабочая температура печи $T_p$ , °С	450	150	560	620	750	920	1110	1200	700	900	850	1120	900
^ Размеры печи: Ширина, м Высота, м	0,5	0,6	0,55	0,52	0,6	0,7	0,7	0,9	0,68	1,4	0,8	1,5	0,9
	0,4	0,5	0,5	0,42	0,4	0,5	0,6	0,6	0,5	1,0	0,6	1,2	0,75
$m=a/b$	6	6	7	5	5	6	8	12	11	8	7	15	12
Продолжение таблицы													
Наименование данных	Задания												
	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Мощность печи, $P_n$ , кВт	5,7	9,6	12,7	10,7	8,1	7,3	3,9	3,5	46	3,6	18	4,5	53

^ Напряжение питающей сети, $U_n$ , В	220	660	380	660	220	380	220	660	660	220	380	220	380
^ Рабочая температура печи $T_{п}$ , $^{\circ}\text{C}$	800	660	790	870	960	1000	690	1115	1120	500	700	660	1100
^ Размеры печи: Ширина, м	0,5	0,75	0,92	0,82	0,6	0,5	0,4	1,7	1,9	0,5	0,9	0,55	1,2
Высота, м	0,35	0,6	0,7	0,7	0,4	0,3	0,35	1,3	1,5	0,3	0,6	0,4	0,8
$m=a/b$	6	9	10	11	8	7	7	15	15	5	6	5	

### 2.3.3 Результаты и выводы:

Результаты расчетов сравнивают с заданными данными и оценивают качество проведенных вычислений.

## 2.4 Практическое занятие № 6 (2 часа).

**Тема:** «Тепловой расчет электропечей сопротивления»

### 2.4.1 Задание для работы:

1. Время цикла, нагрева и приведенный коэффициент излучения.
2. Потребляемое тепло и мощность печи.
3. Удельный расход электроэнергии и производительность печи.
4. Тепловой коэффициент полезного действия.

### 2.4.2 Краткое описание проводимого занятия:

#### Исходные данные:

Наименование нагреваемого изделия  $Ж$  – железо.

Масса изделия  $M = 255$  кг;

Длина электропечи  $L = 4$  м.

Начальная температура  $t_H = 25^{\circ}\text{C}$  (298 К)

Конечная температура  $t_K = 720^{\circ}\text{C}$  (993 К)

Тепловое излучение нагреваемого объекта  $\varepsilon_i = 0,7$

Поверхность обрабатываемого изделия  $F = axb = 2 \times 1 = 2$  м.

Время выдержки  $\tau_{выд} = 1800$  сек

Время охлаждения  $\tau_{охл} = 2520$  сек

Время загрузки и выгрузки  $\tau_{з,в} = 540$  сек

## Решение:

1. Определяется продолжительность цикла термообработки и производительность ЭПС, это является одним из основных показателей технологического режима электропечи.

В общем случае время цикла, сек

$$\tau_{ц} = \tau_n \tau_{выд} \tau_{охл} \tau_{з,в} = 1244 \cdot 1800 \cdot 2520 \cdot 540 = 6104 \text{ сек}$$

где  $\tau_n$  - время нагрева;

$\tau_{выд}$  - время технологической выдержки;

$\tau_{охл}$  - время охлаждения;

$\tau_{з,в}$  - время процесса загрузки-выгрузки.

Время технологической выдержки при проведении теплового расчета ЭПС рассматривается как значение, заданное технологией процесса.

Время процесса загрузки-выгрузки определяют для ЭПС периодического действия либо по данным эксплуатации аналогичной конструкции, либо на основе таких соображений, как масса и геометрические размеры обрабатываемых изделий, тип ЭПС (камерная, шахтная, колпаковая и др.), способ загрузки, степени механизации загрузки и т.п.

1.1. Время нагрева теплотехнических тонких изделий (загрузок).

В режиме постоянной температуры печи время нагрева определяют по формуле

$$\tau_n = cM\nu / C_{np}F_l, \text{ сек.}$$

где  $c$  - удельная теплоемкость материала изделия, Дж/кгС<sup>0</sup>

$M$  - масса изделия, кг;

$F_l$  - поверхность изделия (загрузки), воспринимающая тепловой поток, излучения, м<sup>2</sup>;

$\nu$  - коэффициент нагрева излучением теплотехнических тонких изделий в режиме  $t_H = \text{const}$

1.2. Приведенный коэффициент излучения определяется по формуле

$$C_{np} = \frac{C_0}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}$$

В нашем случае  $F_1 \ll F_2$  поэтому  $C_{np} =$ ,

где  $\varepsilon_1 = 0,7$

где  $C_0 = 5,7 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}^4$  - постоянная Стефана-Больцмана, равная коэффициенту излучения абсолютно черного тела;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$  - коэффициенты теплового излучения, соответственно, нагреваемого объекта (изделия) и излучателя (рабочего пространства);

$F_1, F_2$  - поверхности, соответственно, изделия и рабочего пространства

В инженерных расчетах  $\varepsilon$  можно принимать  $\varepsilon_2 = 0,9, \varepsilon_1 = 0,3 \div 0,7$ , когда  $F_1 \ll F_2$  принимает вид  $C_{np} = 5,7 \cdot \varepsilon_1$

1.3. Значение коэффициента  $\nu$  рассчитывают по формуле

$$\nu = \frac{T_H}{Q} \left[ 0,575 \lg \frac{\left( 1 + \frac{T_H}{T_{п}} \right) \left( 1 - \frac{T_H}{T_{п}} \right)}{\left( 1 - \frac{T_K}{T_{п}} \right) \left( 1 + \frac{T_K}{T_{п}} \right)} + 0,5 \arctg \frac{(T_K - T_H)/T_{п}}{1 + T_K \cdot T_H / T_{п}^2} \right]$$

Значение  $\nu = 0,016$  при  $t_H = \text{const}$

где  $T_{п}$  - температура печи, К;

$T_H, T_K$  - температура изделия соответственно в начале и конце процесса нагрева, К.

Для упрощения расчетов значение коэффициента  $\nu = f(t_H, t_K)$

представлено на рис. 1.18 (1) при начальной температуре изделия  $t_H = 20^\circ \text{C}$ .

В том случае, если  $t_H > 20^\circ \text{C}$  по рис. 1.18 (1) вначале определяют  $\nu_1$  для фактического значения конечной температуры нагрева, затем определяют  $\nu_2$  для конечной температуры, значение которой равно фактической начальной температуре и разность  $\nu_1 - \nu_2$  соответствует значению  $\nu$  для фактических условий.

По 1.1. формуле можно решить определение температуры ЭПС, при которой обеспечивается нагрев изделия до требуемой температуры при заданной длительности нагрева.

Коэффициент конвективной теплоотдачи  $X_K$  определяется по зависимости от скорости циркулирующей атмосферы, ее теплофизических свойств, геометрических размеров и формы обрабатываемых изделий.

2. Потребляемую печью мощность можно определить по количеству тепла

$$Q_{\text{ц}} = Q_{\text{пол}} Q_{\text{всп}} \Sigma Q_{\text{пот}}$$

или по

$$P_{\text{потр}} = P_{\text{пол}} P_{\text{всп}} \Sigma P_{\text{пот}}, \text{ кВт}$$

где  $Q_{\text{пол}}$  или  $P_{\text{пол}}$  - количество тепла или мощность, необходимая для нагрева обрабатываемых изделий (полезная), Вт;

$Q_{\text{всп}}$  или  $P_{\text{всп}}$  - количество тепла или мощность, необходимая для нагрева вспомогательных приспособлений (корзин, конвейерных лент, поддонов и др.), Вт;

$\Sigma Q_{\text{пот}}$  или  $\Sigma P_{\text{пот}}$  - суммарное количество тепла или мощности, необходимая для компенсации тепловых потерь, Вт.

2.1. Определение вспомогательной мощности

$$P_{\text{всп}} = \frac{C_{\text{всп}} \cdot M_{\text{всп}} (t_{\text{Квсп}} - t_{\text{Нвсп}})}{\tau_{\text{II}}} + C_{\text{Г,всп}} A_{\text{Г,всп}} (t_{\text{II}} - t_{\text{Н,Г,всп}})$$

где  $M_{\text{всп}}$  - масса вспомогательных приспособлений, кг;

$C_{\text{всп}}$  - удельная теплоемкость материала вспомогательных приспособлений, Дж/кг $^\circ\text{C}$

$t_{\text{К,всп}}$ ,  $t_{\text{Н}}$ ,  $t_{\text{всп}}$  - температура вспомогательных приспособлений соответственно в конце и начале нагрева,  $^\circ\text{C}$ ;

$t_{\text{II}}$  - температура печи;

$A_{\text{Г,всп}}$  - массовый расход специального газа, кг/С;

$C_{\text{Г,всп}}$  - удельная массовая теплоемкость специального газа,  $^\circ\text{C}$ ;  $t_{\text{НГ,всп}}$  - начальная температура специального газа,  $^\circ\text{C}$ .

Тепловые потери через загрузочный и разгрузочный проемы, через различные отверстия в футеровке определяются составляющими теплообмена пенного пространства и окружающей среды – конвективной и излучения.

Составляющую теплообмена излучением  $P_{\text{потл}}$  через открытые отверстия (проемы) рассчитывают так:

$$P_{\text{потл,II}} = 5,7 \varepsilon_{\text{отв}} [(T_{\text{II}}/100)^4 - (T_{\text{окр}}/100)^4] - F_{\text{отв}} \varphi,$$

где  $\varepsilon_{\text{отв}}$  - коэффициент теплового излучения отверстия (проема);

$\varphi$  - коэффициент диафрагмирования, учитывающий глубину отверстия (проема) и экранирующее действие его стенок (1) рис.1.27.

Принимают  $\varepsilon_{\text{отв}} = 0,8$  для крупных отверстий, размеры которых соизмеримы с размерами печного пространства, и  $\varepsilon_{\text{отв}} = 1,0$  для малых отверстий.

Конвективную составляющую определяют на основе экспериментальной формулы Доброхотова. Однако, эта формула была получена для печей с  $t_H = 800 \div 900^\circ\text{C}$ . С

введением поправки на рабочую температуру печи при  $t_{\text{II}} = 800^\circ\text{C}$  формула Доброхотова принимает вид:

$$P_{nom,K}=320F_{ome}h^{0,5}t_{II}/l_{ome}^{0,4}$$

$h, F_{ome}, l_{ome}$  - высота, площадь сечения отверстия и его глубина.

Если загрузочный (разгрузочный) проем или отверстия остаются открыты в течение всего, процесса термообработки, то мощность, необходимая для компенсации тепловых потерь через открытые отверстия.

$$P'_{nom,ome}=P_{nom,H} P_{nom,K}$$

В печах периодического действия загрузочные проемы открываются на короткое время  $\tau_{откр}$ . Для такого случая

$$P_{nom,ome}=(P_{nom,H} P_{nom,K}) \tau_{откр}/\tau'_H$$

где  $\tau_{откр}, \tau'_H$  - продолжительность периодов открытого (разгрузочного) загрузочного проема и режима  $q_{пол}=const$  (расчет  $\tau'_H$  см. формулу (1.1))

Мощность, необходимая для компенсации тепловых потерь печи (зоны), в общем случае будет:

$$P_{nom}=k_2(P_{\phi} P'_{nom,ome} \tau_{откр}/\tau'_H)$$

В нашем случае при технологических процессах (в период работы)

дверь печи находится в закрытом состоянии до конца технологического цикла, по этой причине принимаем

$$P_{nom} = 0,05 P_{пол}, \text{ кВт},$$

где  $k_2$  - коэффициент запаса на потери, не учтенные в расчете, например на увеличение потерь засчет старения и отклонений свойств футеровки от принятых в расчете, дополнительных потерь через неплотности в футеровке, футеровочные швы, тепловые короткие замыкания и т.д. (на практике принимают  $k_2= 1,2 \div 1,4$ ).

Тепловые потери через закрытые дверцы рассчитывают так же, как и тепловые потери через стенки.

## 2. Определение полезной мощности электропечей (зоны).

Полезная мощность определяется теплотой, которая воспринимается обрабатываемым изделием в процессе нагрева.

Определяется по формуле: (при  $q_{пол}=const$ )

$$P_{пол}=q_{пол}F=cM(t_K-t_H)/\tau_H, \text{ кВт}$$

где  $q_{пол}$  - плотность теплового потока,  $q_{пол}=const$ ;

$F$  - поверхность обрабатываемого изделия,  $m^2$ ;

$C$  - удельная теплоемкость изделия, Дж/ кг  $^{\circ}C$ ;

$M$  - масса изделия, кг;

$t_K$  - конечная,  $^{\circ}C$ ;

$t_H$  - начальная температура,  $^{\circ}C$ ;

$\tau_H$  - время нагрева, сек.

Определяется установленная мощность электропечи  $P_y$ , кВт по формуле:

$$P_y = k_1 \cdot P_{номр}, \text{ кВт},$$

где  $P_{номр}$  - мощность потребляемая ЭПС при заданном режиме термообработки, Вт;

$k_1$  - коэффициент избытка мощности (коэффициент запаса),

учитывающий постепенное увеличение, в результате окисления сопротивления нагревательных элементов.

Обычно  $k_1 = 1,1 \div 1,2$  для ЭПС непрерывного действия

$k_2 = 1,2 \div 1,4$  для ЭПС периодического действия

4. Далее определяют удельный расход электроэнергии.

$$\Xi = P_{номр} / E, \text{ Дж/ кг},$$

где  $E$  - производительность ЭПС, кг/сек.

4.1. Определение производительности ЭПС периодического действия.



$$E = M/\tau_{\text{ц}}, \text{ кг/сек,}$$

где М - масса единовременной загрузка печи, кг; для ЭПС непрерывного действия

$$E=Lm/\tau_{\text{ц}}$$

Где m - масса загрузки на участке электропечи длиной 1 м, кг/м;

L - длина электропечи, м.

5. Тепловой коэффициент полезного действия ЭПС определяется

$$\eta_T = P_{\text{пол}}/P_{\text{потр}}, \%$$

Таблица №1 Задания для теплового расчета электропечи сопротивления *по курсу*

Наименование данных	Задания												
	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
Наименование нагреваемых изделий	П	З	И	Пал	С	В	М	Г	А	Гал	К	Коб	МоЛ
Масса изделия М, кг	325	405	67	96	89	166	155	406	370	330	310	290	275
Длина электропечи, L, м	3,5	4,5	1,1	1,6	1,3	1,7	2,4	3,8	3,4	2,9	2,0	2,7	2,6
Начальная температура, $t_H$ , °C	23	27	34	42	37	30	20	18	26	29	32	31	55
Конечная температура $t_K$ , °C	900	1200	1010	1000	760	790	895	880	660	1010	1000	1200	1300
Тепловое излучение нагреваемого объекта, $\epsilon_1$	0,55	0,6	0,6	0,4	0,5	0,6	0,27	0,35	0,45	0,44	0,5	0,66	0,29
Поверхность обрабатываемого изделия $F$ , м <sup>2</sup>	2,1	2,3	1,5	1,7	1,6	1,3	1,6	2,4	2,6	1,0	0,9	1,5	1,3

Время выдержк и, $\tau_{\text{выд}}$ , сек	$9 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^4$	$7,1 \cdot 10^4$	$11 \cdot 10^4$	$10 \cdot 10^4$	$21 \cdot 10^4$	$22 \cdot 10^4$	$15 \cdot 10^4$	$13 \cdot 10^4$	$9 \cdot 10^4$	$8,5 \cdot 10^4$	$8 \cdot 10^4$	$6,6 \cdot 10^4$
Время охлажден ия, $\tau_{\text{охл}}$ , сек	$1,2 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^3$	$2,5 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3$	$1,6 \cdot 10^3$	$1,3 \cdot 10^3$	$1,9 \cdot 10^3$	$1,7 \cdot 10^3$	$3,6 \cdot 10^3$	$3,2 \cdot 10^3$	$1,9 \cdot 10^3$	$2,1 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3$
Время загрузки и выгрузки, $\tau_{3,в}$ , сек	120 0	12 50	130 0	136 0	145 0	110 0	135 0	160 0	200 0	185 0	177 0	144 0	114 0

Продолжение таблицы №1

Наименов ание данных	Задания											
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Наименов ание нагреваем ых изделий	Н	О	Св	Ц	Р	Ж	Ма	Х	Рт	Т	Рy	Ос
Масса изделия М, кг	520	505	355	210	180	615	600	535	715	673	195	265
Длина электропе чи, L, м	3,0	2,8	3,5	2,8	0,9	3,1	4,7	4,3	5,0	4,1	0,7	0,85
Начальная температу ра, $t_n$ , °C	67	97	17	10	23	29	35	43	48	33	22	21
Конечная температу ра $t_k$ , °C	125 0	111 5	100 5	975	130 0	106 0	870	795	850	910	960	825
Тепловое излучение нагреваем ого объекта, $\varepsilon_1$	0,23	0,32	0,43	0,54	0,64	0,51	0,3 2	0,2 9	0,3	0,5	0,22	0,57

Поверхность обрабатываемого изделия F, м <sup>2</sup>	1,4	1,1	1,6	0,9	0,4	1,2	1,7	1,9	1,8	2,4	0,3	05
Время выдержки, τ <sub>выд</sub> , сек	8·10 <sup>4</sup>	6,6·10 <sup>4</sup>	7,5·10 <sup>4</sup>	10,5·10 <sup>4</sup>	21·10 <sup>4</sup>	23·10 <sup>4</sup>	20·10 <sup>4</sup>	16·10 <sup>4</sup>	14·10 <sup>4</sup>	11,5·10 <sup>4</sup>	10·10 <sup>4</sup>	24·10 <sup>4</sup>
Время охлаждения, τ <sub>охл</sub> , сек	2,4·10 <sup>3</sup>	2,7·10 <sup>3</sup>	1,1·10 <sup>3</sup>	1,4·10 <sup>3</sup>	1,5·10 <sup>3</sup>	2,2·10 <sup>3</sup>	2·10 <sup>3</sup>	3·10 <sup>3</sup>	2,7·10 <sup>3</sup>	1·10 <sup>3</sup>	1,6·10 <sup>3</sup>	2,7·10 <sup>3</sup>
Время загрузки и выгрузки, τ <sub>з,в</sub> , сек	1370	1630	1580	500	440	1100	1000	1240	1400	1300	630	690

#### 2.4.3 Результаты и выводы:

По результатам расчета определяют установленную мощность, проводят выбор материалов и толщины футеровки.

#### 2.5 Практическое занятие № 7,8 (4 часа)

**Тема:** «Определение параметров, выбор и проверочный расчет электрокалориферной установки»

##### 2.5.1 Задание для работы:

1. Выбор рациональной формы электродов
2. Определение геометрических размеров электродной системы
3. Определение мощности, диапазона ее регулирования и проверка работоспособности аппарата

##### 2.5.2 Краткое описание проводимого занятия:

*Определение мощности электрокалорифера*

Теплопроизводительность электрокалорифера ( $Q_k$ ) в кДж/ч для отопительно-вентиляционной системы животноводческих помещений определяется из уравнения теплового баланса:

$$Q_k = Q_{ог} + Q_{в} - Q_{ж} ,$$

где  $Q_{ог}$  —теплопотери через ограждения помещений, кДж/ч;

$Q_{в}$  —теплопотери, обусловленные вентиляцией, кДж/ч;

$Q_{ж}$  —тепло, выделяемое животными, кДж/ч.

Теплопотери через ограждения могут быть определены по формуле

$$Q_{ог} = q_o V (t_{вн} - t_{н}) ,$$

где  $q_o$  —тепловая характеристика помещения, т. е. количество тепла, теряемого за 1 час 1 м<sup>3</sup> объема при разности температур 1°С, кДж/ (м<sup>3</sup> • град, ч);

$V$  —объем помещения, м<sup>3</sup>;

$t_{вн}$  и  $t_{н}$  —соответственно температура внутри и снаружи помещения, °С.

Объем помещения находится по количеству животных (птицы) и объему, приходящемуся на одну голову. Количество тепла, теряемого с вентиляцией:

$$Q_{в} = L_{в} C_{в} \gamma_{в} (t_{вн} - t_{н}) = K_{в} V C_{в} \gamma_{в} (t_{вн} - t_{н}) ,$$

где  $L_{в}$ —подача вентиляционных установок, м<sup>3</sup>/ч;

$C_{в}$ —массовая теплоемкость воздуха,  $C_{в}=1,0$  кДж/(кг•град);

$\gamma_{в}$ —плотность воздуха,  $\gamma_{в}=1,2$  кг/м<sup>3</sup>;

$K_{в}$ —часовая кратность воздухообмена;

$V$ —объем помещения, м

Подача вентиляционных установок  $L_{в}$  при определении мощности устройств отопления находится по удалению избыточной влаги и углекислоты. Расчет рекомендуется вести в кубических метрах на голову в час. В качестве расчетного принимается большее значение расхода, полученного для указанных вредностей. Методика соответствующих расчетов приведена в литературе [1].

Оптимальные параметры микроклимата для различных видов животных и птицы приведены в «Нормах технологического проектирования ферм крупного рогатого скота, свиноводческих и птицеводческих», а также в литературе [1; 3; 4].

Определив вентиляционную норму на голову  $L_{г}$  и зная число животных в помещении  $N$ , необходимую производительность вентиляционной установки находят по формуле  $L_{в} = L_{г} N$ .

Кратность воздухообмена в помещении равна:

$$K_{в} = \frac{L_{в}}{V} \text{ Допустимая кратность воздухообмена в животноводческих помещениях } K_{в}$$

=4-15. Количество тепла  $Q_{ж}$  в кДж/ч, выделяемого животными:

$$Q_{ж} = Q_1 N,$$

где  $Q_1$ —количество тепла, выделяемого одним животным, кДж/ч.

$$\text{Общая мощность системы отопления } P_{к} = \frac{Q_{к}}{3600}$$

Необходимо учесть, что в животноводческом помещении обычно устанавливается

одна, две, четыре и даже более отопительно-вентиляционных установок.

Следовательно, мощность одного электрокалорифера  $P_{к1}$  будет равна:

$$P_{к1} = \frac{P_{к}}{Z}$$

а подача одного вентилятора в м<sup>3</sup>/ч:

$$L_{в1} = \frac{L_{в}}{Z}$$

где  $Z$ —число вентиляционных установок.

### 2.5.3 Результаты и выводы:

Результаты расчетов сравнивают с заданными данными и оценивают качество проведенных вычислений.

## 2.6 Практическое занятие № 9 (2 часа)

**Тема:** «Расчет нагревательных проводов и кабелей»

### 2.6.1 Задание для работы:

1. Определение длины одного нагревательного элемента и их количества

### 2.6.2 Краткое описание проводимого занятия:

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  $\Delta P_{раб} \leq \Delta P_{доп}$ .

Следует помнить, что расчётная мощность принимается: для однофазных нагревателей –  $P_{расч} = P_y / 3$ , а для трехфазных нагревателей –  $P_{расч} = P_y$ ,

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, мм<sup>2</sup>.

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 (3.65) видно, что геометрические параметры нагревателя можно определить по напряжению, току, сопротивлению и мощности. Рассмотрим методику расчета по напряжению.

1. По известной расчётной мощности  $P_{расч}$ , Вт, и допустимой удельной мощности  $\Delta P_{доп}$ , Вт/м, находят необходимую минимальную

длину провода, м:

$$L_{min} = \frac{P_{расч}}{\Delta P_{доп}}.$$

2. По известным параметрам нагревателя определяют удельное допустимое напряжение (В/м):

$$U_{lyd} = \sqrt{\Delta P_{don} \cdot R_{lyd}}.$$

3. Затем рассчитывают минимальную длину одной секции, м, нагревателя по выражению:

$$l_c = U / U_{lyd}$$

4. Число секции на одну фазу определяют по выражению:

$$N_c = L_{min} / l_c.$$

Полученное расчётом число округляют до ближайшего большего целого числа  $Z_c$ .

5. Тогда мощность одной секции, Вт, будет составлять:

$$P_c = P_{расч} / Z_c$$

6. Так как мощность одной секции может быть определена как

$$P_c = U^2 / R_c = U^2$$

7. Затем уточняют удельную рабочую нагрузку нагревателя, Вт/м:

$$\Delta P_{раб} = P_c / l_{расч}.$$

8. Определяют полную длину нагревателя одной фазы:

$$L_{\phi} = l_{расч} \cdot Z_c.$$

Затем определяют длину нагревателя в целом:

$$L_H = 3 \cdot L_{\phi}$$

9. Уточняют величину мощности, Вт, однофазного нагревателя по формуле:

$$P_{\phi} = \Delta P_{раб} \cdot L_{\phi},$$

а трёхфазного нагревателя:

$$P_{раб} = 3 \cdot P_{\phi} = \Delta P_{раб} \cdot L_H$$

### 2.6.3 Результаты и выводы:

Результаты расчетов сравнивают с заданными данными и оценивают качество проведённых вычислений.

## 2.7 Практическое занятие № 10, 11 (4 часа)

**Тема:** «Расчет установки для обработки грубых кормов электрическим током»

### 2.7.1 Задание для работы:

1. Определение объема установки  $V$  и её размеры  $a$ ,  $b$ ,  $c$ .
2. Определение начальной удельной электропроводности соломенной резки.
3. Определение потребляемой установкой мощности в начале и в конце процесса.
4. Определение удельного расхода электроэнергии и стоимости обработки всей массы соломенной резки.

### 2.7.2 Краткое описание проводимого занятия:

Начальная мощность, потребляемая установкой, кВт;

$$P_H = \frac{V \cdot \gamma_H \cdot U^2}{l^2} \cdot 10^{-3}, \quad (1)$$

где  $V$  – объем установки для соломенной резки,  $\text{м}^3$ , определяется одновременно подготавливаемым количеством соломенной резки  $G$  (тонн) и плотностью укладки  $\rho$

(принимается  $\rho = 500\text{--}700 \text{ кг/м}^3$ );

$U$  – приложенное напряжение, В;

$\gamma_H$  – начальная удельная электропроводность соломенной резки,  $1/\text{Ом}\cdot\text{м}$ ;

$l$  – высота укладки соломенной резки т.е. расстояние между электродами, м, принимается из условия, чтобы напряженность поля в слое соломы не превышала  $250 \text{ В/м}$ ;

$$\gamma_H = \gamma_{20} \cdot [1 + \alpha \cdot (20 - t_H)], \quad (2)$$

где  $\alpha$  – температурный коэффициент проводимости резки, принимается

$0,025 - 0,031/^\circ\text{C}$ ;

$\gamma_{20}$  – электропроводность при  $20^\circ\text{C}$ ,  $1/\text{Ом}\cdot\text{м}$ , определяется по формуле:

$$\gamma_{20} = 0,9 \cdot 10^{-6} \cdot (0,031 \cdot W - 1) \cdot (1 + 0,011 \cdot K) \cdot \rho^2, \quad (3)$$

где  $W$  – степень увлажнения, % ,

$K$  – концентрация содово-солевого раствора, %; (обычно  $K=2\%$ ).

Мощность установки в конце процесса нагрева, кВт

$$P_K = P_H [1 + \alpha \cdot (t_{\text{доп}} - t_H)] = P_H (1 + \alpha \cdot \Delta t), \quad (4)$$

где  $t_{\text{доп}}$  – допустимая температура нагрева,  $t_{\text{ДОП}} = 85^\circ\text{C}$ .

Таблица 1 – Таблица вариантов

G=10 тонн									
Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9
W, %	35,1	35,2	35,3	35,4	35,5	35,6	35,7	35,8	35,9
t <sub>н</sub> , °C	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Вариант	10	11	12	13	14	15	16	17	18
W, %	36,0	36,1	36,2	36,3	36,4	36,5	36,6	36,7	36,8
t <sub>н</sub> , °C	19	20	21	22	21	20	19	18	17
G=12 тонн									
Вариант	19	20	21	22	23	24	25	26	27
W, %	36,9	37,0	34,1	34,2	34,3	34,4	34,5	34,6	34,7
t <sub>н</sub> , °C	16	15	14	13	12	11	10	9	8
Вариант	28	29	30	31	32	33	34	35	36
W, %	34,8	34,9	35,0	35,1	35,2	35,3	35,4	35,5	35,6
t <sub>н</sub> , °C	9	10	11	12	13	14	15	16	17
G=14 тонн									
Вариант	37	38	39	40	41	42	43	44	45
W, %	35,7	35,8	35,9	36,0	36,1	36,2	36,3	36,4	36,5
t <sub>н</sub> , °C	18	19	20	21	22	23	22	21	20
Вариант	46	47	48	49	50	51	52	53	54
W, %	36,6	36,7	36,8	36,9	37,0	34,1	34,2	34,3	34,4
t <sub>н</sub> , °C	19	18	17	16	15	14	13	12	11
G=16 тонн									
Вариант	55	56	57	58	59	60	61	62	63
W, %	34,5	34,6	34,7	34,8	34,9	35,0	35,1	35,2	35,3
t <sub>н</sub> , °C	10	9	8	9	10	11	12	13	14
Вариант	64	65	66	67	68	69	70	71	72
W, %	35,4	35,5	35,6	35,7	35,8	35,9	36,0	36,1	36,2
t <sub>н</sub> , °C	15	16	17	18	19	20	21	22	23

Продолжительность нагрева до допустимой температуры, с:

$$\tau = \frac{c \cdot V \cdot \ln(\alpha \cdot \Delta t + 1)}{\eta \cdot P_H \cdot \alpha}$$

где c – объемная теплоёмкость соломенной резки, принимается 2,3 кДж/(кг·°C)=1150

кДж/(м³·°C);

η – к.п.д. установки, принимается 0,95.

Приращение температуры резки и потребляемая установкой мощность по истечении некоторого времени работы:

$$\Delta t = \frac{1}{\alpha} \cdot \left( e^{\frac{\eta \cdot P_H \cdot \alpha}{c \cdot V} \cdot \tau} - 1 \right), \quad P_{\tau} = P_H \cdot e^{\frac{\eta \cdot P_H \cdot \alpha}{c \cdot V} \cdot \tau} \quad (6)$$

Удельный расход электроэнергии, стоимость обработки, руб.;



$$A_{\text{уд}} = \frac{P_{\text{сп}} \cdot \tau}{G}, \quad S = P_{\text{сп}} \cdot \tau \cdot S_3 = A_{\text{уд}} \cdot G \cdot S_3 \quad (7)$$

$S_3$  - стоимость электроэнергии, руб/кВт·ч, составляет 1,6 руб/кВт·ч.

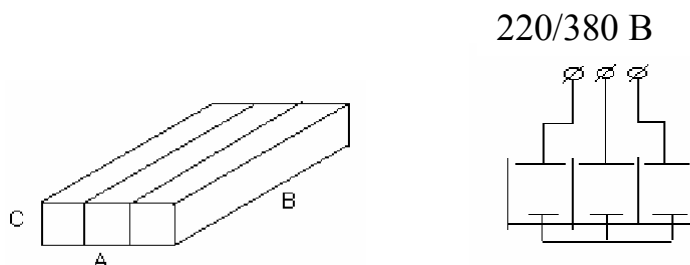


Рисунок 1 – Эскиз установки для обработки грубых кормов электрическим током

### 2.7.3 Результаты и выводы:

Представить эскиз установки для обработки грубых кормов электрическим током с рассчитанными геометрическими параметрами.

## 2.8 Практическое занятие № 12,13 (4 часа),

**Тема:** «Конструктивный расчет электросепаратора»

### 2.8.1 Задание для работы:

1. Определение параметров электрозерноочистительной установки

### 2.8.2 Краткое описание проводимого занятия:

1. Длина зоны зарядки, м

$$l = \frac{\Pi}{60 \cdot \pi \cdot D \cdot n \cdot q} \quad (1)$$

где  $\Pi$  – производительность сепаратора, кг/ч,

$D$  – диаметр рабочего барабана, принимается  $D=0,4$  м,

$n$  – число оборотов вращающегося барабана, об/мин,

$q$  – удельная плотность засыпки зерна на поверхности барабана, принимается  $q=1,5$  кг/м<sup>2</sup>

2. Оптимальное расстояние между коронирующими проводниками, м

$$d = h \cdot (0,3 + 0,04 \cdot \frac{D}{h}) \quad (2)$$

где  $h$  – расстояние между электродами, м

3. Количество коронирующих проводников

$$N = \frac{l}{d} \quad (3)$$

4. Критическая напряженность электрического поля, при которой возникает коронный разряд, В/м

$$E_k = 30,3 \cdot 10^5 \left(1 + \frac{0,03}{\sqrt{r_0}}\right) \quad (4)$$

где  $r_0$  – радиус коронирующего электрода, м, принимается минимальным из условия механической прочности,  $r_0 = 0,15$  мм.

5. Начальное напряжение, В, при котором возникает коронный разряд

$$U_0 = E_k \cdot r_0 \left[ \frac{\pi \cdot h}{d} - \ln \frac{\pi \cdot r_0}{d} \left( 2 - \frac{2 \cdot h}{d} \right) \right] \quad (5)$$

6. Ток коронного разряда, А/м, с 1 м коронирующего электрода

$$I_l = \frac{\left( 2,23 - 0,75 \frac{2 \cdot h}{D} \right) \cdot \pi^2 \cdot k \cdot \nu \cdot B \cdot U \cdot (U - U_0) \cdot \varepsilon_0}{9 \cdot d^2 \left[ \frac{\pi \cdot h}{d} - \ln \frac{\pi \cdot r_0}{d} \left( 2 - \frac{2 \cdot h}{d} \right) \right]} \quad (6)$$

где  $B$  – поправочная функция, принимается  $B = 1,3$

$\nu$  – функция зависящая от конфигурации электродов

$$\nu = 10^{-2} \left( \frac{2,87 - 0,74 \cdot h/d}{h/d - 0,47} \right);$$

$U$  – приложенное к электродам напряжение, В;

$h$  – межэлектродный промежуток, м, принимается  $h = 0,1$  м;

$k$  – подвижность ионов,  $k = 2 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/В·с;

$\varepsilon_0$  – диэлектрическая постоянная,  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м.

7. Полный ток коронного разряда, А

$$I = I_l \cdot L \cdot N$$

где  $L$  – длина барабана, принимается  $L = 1$  м

8. Полезная мощность

$$P = U \cdot I \quad (8)$$

9. Мощность, потребляемая высоковольтным источником из сети

$$P_c = \frac{P}{\eta} \quad (9)$$

где  $\eta$  – КПД, принимается равным,  $\eta = 0,6 \dots 0,8$

### 2.8.3 Результаты и выводы:

В отчете привести пример расчета по использованным формулам, провести анализ полученных значений, представить эскиз установки.

## 2.9 Практическое занятие № 14 (2 часа),

**Тема:** «Технологический расчет электросепаратора»

### 2.9.1 Задание для работы:

1. Рассчитать угол отрыва сухих и влажных зерен

### 2.9.2 Краткое описание проводимого занятия:

1. Угол отрыва (градусов) сухого  $\alpha_1$  и влажного  $\alpha_2$  зерна от поверхности вращающегося барабана.

$$\alpha = \arccos \frac{P_{ц} - F_1 - F_2}{P} \quad (1)$$

где  $P$ ,  $P_{ц}$ ,  $F_1$ ,  $F_2$  – соответственно силы тяжести, центробежная и электрические, действующие на зерно в электрическом поле коронного разряда.

2. Сила тяжести, Н

$$P = m \cdot g \quad (2)$$

где  $g$  – ускорение силы тяжести,  $g=9,81 \text{ м/с}^2$ ,

$$m = \frac{\pi}{6} a \cdot b^2 \cdot \rho,$$

$m$  – масса одного зерна, кг

$a, b$  – соответственно длина и толщина зерна,

$\rho$  – объемная плотность, принимается  $\rho=(1,2 \dots 1,3) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .

3. Центробежная сила, Н

$$P_{ц} = 2 \frac{m v^2}{D} \quad (3)$$

где  $D$  – диаметр барабана, принимается  $D=0,4 \text{ м}$ ,

$v$  – линейная скорость перемещения зерна, м/с,

$n$  – число оборотов вращающегося барабана,  $n=40 \div 60 \text{ об/мин}$ .

4. Электрическая сила воздействия напряженности электрического поля на заряженное зерно, Н,

$$F_1 = E \cdot Q \cdot \mu \quad (4)$$

где  $E$  – напряженность электрического поля на поверхности барабана, В/м, принимается

$$E = 0,7 \frac{U}{h};$$

$U$  – приложенное к электродам напряжение, В;

$h$  – межэлектродный промежуток, м, принимается  $h=0,1 \text{ м}$ ;

$Q$  – величина предельного заряда, Кл, полученного в поле коронного разряда

$$Q = \frac{\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot E \cdot a \cdot b}{1 + (\varepsilon - 1) \cdot \Phi_1} \quad (5)$$

$\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость материала зерна, Ф/м;

$\varepsilon_0$  – диэлектрическая постоянная,  $\varepsilon_0=8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$

$\Phi I$  – коэффициент осевой поляризации зерна, определяется из таблицы 2 по величине отношения  $b/a$ .

Таблица 2 – Коэффициент осевой поляризации зерна

$b/a$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$\Phi I$	0,03	0,06	0,12	0,15	0,20	0,25	0,30	0,31	0,32

$\mu$  – показатель разрядки, величина безразмерная, изменяется от 0 до 1

$$\mu = \frac{1 + 2A - \sqrt{1 + 4A}}{2A}, \quad (6)$$

$$A = \frac{R \cdot C \cdot \beta}{4\pi \cdot \varepsilon_0} \quad (7)$$

$R$  – электрическое сопротивление, Ом, зависящее от влажности зерна,

$C$  – электрическая емкость системы зерно-электрод, Ф,

$\beta$  – параметр, характеризующий скорость зарядки, 1/Ом·м.

Для практических расчетов принимают

$$\beta = \frac{1}{9} \cdot 10^{-12} \cdot E, \quad C = 1,4 \cdot 10^{-5} \cdot b^2 \quad (8)$$

( $b$  – в метрах,  $E$  – вольт /на метр)

5. Электрическая сила взаимодействия заряженного зерна с зарядом барабана, Н,

$$F_2 = \frac{Q^2 \cdot \mu^2}{16 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot x^2} \quad (9)$$

где  $x$  – расстояние между центром заряда зерна и поверхностью барабана, принимается  $x = b/4$

6. Подсчитав все силы для сухого и влажного зерна, определяют углы их отрыва от вращающегося барабана.

**2.9.3 Результаты и выводы:** В отчете привести пример расчета по использованным формулам, провести анализ полученных значений, представить эскиз установки с углами отрыва зерен и размерами.

## 2.10 Практическое занятие № 15 (2 часа),

**Тема:** «Расчет установок электрогидравлического эффекта»

### 2.10.1 Задание для работы:

1. Определение параметров установки электрогидравлического эффекта

### 2.10.2 Краткое описание проводимого занятия:

Расчет установок электрогидравлического эффекта проводится в следующей последовательности.

1. Определяется оптимальное расстояние между электродами, соответствующее

предельно возможной мощности в разрядном контуре, м

$$l = 8 \cdot 10^{-9} \cdot (U_p)^{1,5} \cdot \left(\frac{C}{L}\right)^{0,25} \quad (1)$$

2. Максимальный разрядный ток, А

$$I_M = 0,5 \cdot U_p \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (2)$$

где  $U_p$  – напряжение разряда конденсатора, В, принимается  $U_p = \alpha \cdot U$ , (таблица 1);

$\alpha$  – степень зарядки конденсатора; принимается в пределах  $\alpha=0,72 \div 0,94$  из условия получения максимальной мощности, выделяющейся в разрядном контуре;

$C$  – емкость накопительного конденсатора, Ф, (таблица 1);  $L$  – индуктивность разрядной цепи, Гн, (таблица 1).

3. Сопротивление канала разряда, Ом, в момент максимума силы разрядного тока

$$R_K = 4,4 \cdot 10^7 \cdot l \cdot (I_M)^{-1,5} \quad (3)$$

4. Максимум мощности, Вт, развиваемой в канале разряда

$$P_M = I_M^2 \cdot R_K \quad (4)$$

5. Энергия, выделяемая в межэлектродном промежутке единичным импульсом, Дж

$$W = \frac{C \cdot U_p^2}{2} \quad (5)$$

6. Максимальное давление на фронте волны, развиваемое в канале разряда

$$P_\Phi = 6,1 \cdot (x)^{-0,5} \cdot (W)^{0,625} \cdot (T_p)^{-0,75} \quad (6)$$

7. Средняя мощность разрядной цепи, Вт

$$P_p = \frac{C \cdot U^2 \cdot f}{2} \quad (7)$$

где  $f$  – частота следования импульсов,  $f = 0,2 \dots 2$  Гц.

8. Сопротивление в зарядной цепи конденсатора, Ом

$$R_3 = \frac{1}{f \cdot C \cdot \ln \frac{1}{1-\alpha}} \quad (8)$$

9. Постоянная времени зарядки, с

$$T_3 = R_3 \cdot C \quad (9)$$

10. КПД зарядной цепи

$$\eta_3 = \frac{1}{1 + \frac{2}{T_3}} \quad (10)$$

11. Полная мощность трансформатора

$$P_{mp} = \frac{P_p}{\eta_t \cdot \cos \varphi} \quad (11)$$

для расчетов можно принять значения  $\cos \varphi = 0,75 \dots 0,9$

### 2.10.3 Результаты и выводы:

В отчете привести пример расчета по использованным формулам, провести анализ полученных значений.

## 2.11 Практическое занятие № 16,17 (4 часа).

**Тема:** «Расчет параметров электроплазмолизатора растительного сырья»

### 2.11.1 Задание для работы:

1. Определение параметров электроплазмолизатора

### 2.11.2 Краткое описание проводимого занятия:

Параметры электроплазмолизатора рассчитываются в следующей последовательности.

1. Напряженность, В/м, электрического поля между электродами плазмолизатора

$$E = \frac{U_{\phi}}{l}, \quad (1)$$

где  $U_{\phi}$  – фазное напряжение между электродами сети, составляет 380/220 В;

$l$  – расстояние между электродами, м.

2. Продолжительность процесса плазмолизации, с

$$t = \frac{3 \cdot 10^6 \cdot \rho \cdot K_{\Theta}}{E^3 \cdot \Theta}, \quad (2)$$

где  $\rho, \Theta$  – соответственно удельное электрическое сопротивление и температура обрабатываемого сырья, значение из таблицы 2;

$K\Theta$  - коэффициент токоустойчивости, показывающий как клетки противостоят действию тока, разрушающему оболочку, значение из таблицы 2.

Таблица 2 - Значение  $\rho$  и  $K\Theta$  для отдельных видов растительного сырья

Сырье	$K\Theta$	$\rho$ , Ом·м	Сырье	$K\Theta$	$\rho$ , Ом·м	Сырье	$K\Theta$	$\rho$ , Ом·м
яблоки	1	12	сливы	0,75	18	виноград	1-9	20
груши	1,25	12	свекла	10	9			

3. Скорость перемещения растительного сырья в плазмоллизаторе, м/с

$$v = \frac{G}{3600 \cdot S \cdot \rho_M} \quad (3)$$

где  $G$  – подача технологической линии, кг/ч;

$\rho_M$  – плотность измельченной растительной массы, принимается  $\rho_M = 500 \dots 700 \text{ кг/м}^3$ ;

$S$  – площадь живого сечения потока сырья,  $\text{м}^2$ ,  $S = h \cdot l$ ;

$h$  – ширина рабочего канала барабана, м, принимается  $h = 0,5 \text{ м}$ .

4. Длина зоны электрообработки, м

$$L = v \cdot t$$

5. Частота вращения барабана электроплазмоллизатора,  $\text{мин}^{-1}$

$$n = \frac{60 \cdot v}{\pi \cdot d} \quad (5)$$

где  $d$  – диаметр барабана, принимается  $d = 0,7 \text{ м}$ .

где  $x$  – расстояние между фазными электродами, принимается  $x = 0,01 \text{ м}$ .

где  $K_K$  – конструктивный коэффициент, учитывающий влияние утечки тока, для барабанного электроплазмоллизатора  $K_K = 1,1$ .

6. Площадь одного фазного электрода электроплазмоллизатора,  $\text{м}^2$

$$S_1 = (L - 2 \cdot x) \cdot \frac{h}{3} \quad (6)$$

7. Сила тока электроплазмоллизатора в одной фазе

$$I = U_{\phi} \cdot S_1 \cdot \frac{K_{\kappa}}{\rho \cdot l} \quad (7)$$

8. Общая мощность электроплазмолизатора, Вт

$$P = 3 \cdot U_{\Phi} \cdot I \quad (8)$$

9. Удельный расход электроэнергии на электроплазмолиз, Вт·ч/кг

$$W = \frac{P}{G} \quad (9)$$

10. Стоимость единицы продукции, руб.

$$C_T = W \cdot Ц$$

где Ц – цена электроэнергии, принимается Ц=1,6 руб/кВт·ч

11. Выход сока из растительного сырья для яблок и груш, %

$$B = 68 \cdot \exp \left[ 10^{-2} \left( \frac{12 - \sqrt[3]{500 \cdot K_{\Theta} / 0,05 \cdot \Theta \cdot t - 10^4 P_c^2}}{+ 5 \cdot 10^2 \cdot P_c + 16 \cdot 10^{-4} \cdot E} + \right) \right] \quad (11)$$

$$B = 74 \cdot \exp \left[ 10^{-2} \left( \frac{12 - \sqrt[3]{500 \cdot K_{\Theta} / 0,05 \cdot \Theta \cdot t - 10^6 \cdot P_c^2}}{+ 2 \cdot 10^2 \cdot P_c + 16 \cdot 10^{-4} \cdot E} + \right) \right] \quad (12)$$

где  $P_c$  – средний размер при измельчении частиц, мм

### 2.11.3 Результаты и выводы:

В отчете привести пример расчета по использованным формулам, провести анализ полученных значений, начертить эскиз установки