

А.М. Глушков  
И.В. Юдаев

# Светотехника и электротехнология



УДК ...  
ББК ...  
Ю ...

**Юдаев, И.В.**  
**Ю ...** СВЕТОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ. ЧАСТЬ II  
«ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ»: Электротермия: Курс лекций / А.М.  
Глушков, И.В. Юдаев; Волгогр. гос. с.-х. акад., Волгоград, 2008.  
... с.

ISBN .....

В учебном пособии представлены общие закономерности преобразования электрической энергии в тепловую, а также методы расчёта, выбора и применения электротермического оборудования, используемого в сельскохозяйственном производстве.

Предназначено для студентов вузов, обучающихся по направлению 110300 «Агроинженерия» специальности 110302 – «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства».

УДК .....  
ББК .....

**Рецензенты:** .....

©  
Глушков А.М., Юдаев И.В., 2008  
©

ISBN .....

Волгоградская государственная  
сельскохозяйственная академия, 2008

# **ЭЛЕКТРОТЕРМИЯ**

## **РАЗДЕЛ 1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОТЕРМИИ И ПРИМЕНЕНИЕ ЕЁ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ**

### **1.1. Электротермия и сельскохозяйственное производство**

**Электротермия** (от электро... и греч. *thérme* - жар, тепло) – 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 следующие виды нагрева: нагрев сопротивлением, дуговой нагрев, индукционный нагрев, диэлектрический нагрев, электронный нагрев, нагрев излучением оптического квантового генератора (лазера), плазменный нагрев.

Понятие «электротермические установки» (или «электротермическое оборудование») включает в себя следующее электротехнологическое оборудование: электрические печи, плазменные реакторы, электрические нагревательные приборы промышленного, коммунального и бытового назначения и т.п.. Применение электрической

энергии для генерирования теплоты обеспечивает: 1) возможность концентрации большой энергии в малых объемах, следствием чего могут быть высокие температуры, недостижимые при других способах теплогенерации; 2) большие скорости нагрева и компактность конструкции электротермических установок; возможность регулирования значения температуры и областей её распределения в рабочем пространстве электротермической установки, что позволяет осуществлять равномерный нагрев в больших объёмах 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; 3) 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 (и частности, уменьшение угара); 4) отсутствие дымовых газов (продуктов сгорания топлива), что позволяет увеличить коэффициент использования тепла – КПД электротермических установок, обуславливая чистоту их рабочих поверхностей; 5) транспортабельность и простоту подачи электрической энергии (по линиям электропередачи).

Более широкое развитие электротермии сдерживается из-за существующих недостатков, присущих такому способу генерации теплоты: 1) более высокая стоимость эксплуатации электротермических установок по сравнению с другими типами нагревателей и печей; 2) 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; 3) меньшая надёжность, долговечность и ремонтпригодность электротермических установок; 4) зависимость работы электротермической установки от режима работы энергосистемы.

Электротермические установки применяют в тех случаях, если:

- технологический процесс нельзя осуществить без электротермии (в этом случае целесообразность определяется технологическими требованиями и качеством получаемой продукции, как в промышленности, так и в сельском хозяйстве);

- можно получить продукцию более высокого качества (экономический эффект зависит от того, насколько выгодно от улучшения свойств продукции компенсируется увеличение её стоимости);

- улучшаются условия труда, повышается безопасность обслуживающего персонала;

- достигается снижение себестоимости (благодаря более высокой производительности труда) или уменьшение капитальных затрат, включая затраты в смежных отраслях производства.

На долю электротермии приходится до 15% от всей потребляемой промышленностью электрической энергии. На базе электрического нагрева созданы и развиваются производства специальных сталей, ферросплавов, цветных и лёгких металлов и сплавов, твёрдых сплавов, редких металлов, карбида кальция, фосфора и других продуктов; осуществляется обработка металлов давлением и их термическая обработка; реализуются вопросы электрификация быта.

Агропромышленный сектор представляет собой крупного потребителя тепловой энергии, основная часть которой тратится на различные технологические нужды. Низкотемпературный нагрев в сельском хозяйстве является наиболее перспективной отраслью

электротермии. Однако проблема использования электроэнергии для теплофикации технологических процессов в сельскохозяйственном производстве и быту остается одной из наиболее актуальных производственных задач.

Сельскохозяйственным предприятиям, как объектам теплоснабжения присущи характерные особенности, к которым в первую очередь следует отнести такие как:

- низкая плотность тепловых нагрузок и большая рассредоточённость потребителей, что обуславливает широкое распространение децентрализованных систем теплоснабжения от топливных котельных, обладающих целым рядом известных недостатков (большие транспортные расходы на доставку топлива, потери топлива при транспортировке и хранении, значительные затраты ручного труда на обслуживание большого количества маломощных топливных установок по причине сложности автоматизации, “перетопы” в связи с недостаточной гибкостью топливных установок и неполным сгоранием топлива из-за плохого состояния оборудования и нередким применением низкокалорийного топлива (бурый уголь, дрова и т.п.), что снижает КПД топливных установок до 0,08...0,15 вместо 0,35...0,5, определенных техническими характеристиками);

- большая неравномерность нагрузки и малый коэффициент использования максимума, что сопровождается перерасходом топлива в периоды провалов нагрузки;

- для нормальной жизнедеятельности животных, птиц и растений необходимы оптимальные параметры микроклимата, не допускающие резких колебаний.

В сельскохозяйственном производстве большинства развитых стран электроэнергия широко используется в качестве источника тепла. Так, например, к началу 70-х годов на тепловые нужды производства и быта

приходилось в Австрии - 40%, в Германии - 55%, в США - более 50% от общего потребления электроэнергии сельским хозяйством. Причем удельный вес электроэнергии, используемой на электротеплоснабжение, продолжает расти быстрыми темпами и составляет в настоящее время существенную часть энергетического баланса, и даже оказывает существенное влияние на экономику этих стран.

Именно тенденция возрастания энергоемкости сельскохозяйственной электротермии является отражением более общих процессов, происходящих в мировом сельском хозяйстве. Потребность в энергоресурсах удваивается через каждые 10...15 лет. Рост производства сельхозпродукции сопровождается возрастанием энергоемкости технологий её производства: так, прирост сельскохозяйственной продукции на 1% требует увеличения расхода энергоресурсов на 2...3%. Такой рост энергозатрат, в связи с увеличением производства сельхозпродукции, характерен и, видимо, пока неизбежен для всех промышленно развитых стран, несмотря на предпринимаемые меры по их минимизации. Например, в XX веке удвоение урожаев в США сопровождалось десятикратным повышением расхода энергии.

Уровень развития электротеплоснабжения сельского хозяйства нашей страны также достаточно высок. Так, удельный вес электронагрева в общем потреблении электроэнергии агропромышленным сектором увеличился с 15...20% в 1975 году до 31 % в 1993 году. Основными потребителями энергии являлись и являются системы, обеспечивающие оптимальную среду обитания животных, и технологические процессы, связанные с содержанием, кормлением, уходом за животными и первичной обработкой производимой ими продукции. В сумме они составляют основную долю в общих энергозатратах. На ферме с поголовьем 1200 коров установленная мощность технологического оборудования составляла в 80-х годах 21,3%, централизованное отопление и горячее

водоснабжение - 28%, электрокалориферы в системах вентиляции - 46,4%, то есть большая часть энергобаланса приходилась на тепловые процессы. По данным ВИАЭСХ в общем балансе энергии, затрачиваемой на получение сельскохозяйственной продукции в расчёте на одного человека, доля тепловой энергии составляет до 90%. Из общей потребности сельского хозяйства страны в различных видах энергии на долю тепловой приходится порядка 65%.

При этом быт сельского населения в качестве объекта электротеплоснабжения длительное время серьёзно не рассматривался и это привело к тому, что электропотребление сельским жителем в 2 раза ниже, чем городским. В то же время в середине 90-х годов в сфере быта и услуг потреблялось уже 40% электрической энергии и подобная тенденция позволяет характеризовать быт сельского населения как чрезвычайно перспективную область применения электротеплоснабжения.

Широкое применение электроэнергии для электрификации тепловых процессов сдерживается недостаточной мощностью электрических станций и пропускной способностью сельских сетей, ограниченной номенклатурой и объемом выпускаемого электротермического оборудования, а также не всегда грамотным решением вопросов применения электрического нагрева, что не позволяет получить от электронагрева максимальный экономический эффект. Например, одно из главных преимуществ электрической энергии – ее делимость и способность передаваться на большие расстояния – сводится к минимуму применением электродвигателей. Мощные централизованные электродвигатели были в середине 80-х годов призваны заменить котельные, работающие на жидком и твердом топливе. Подобное строительство сопряжено с дополнительными затратами на возведение трубопроводов, их теплоизоляции, с дополнительными потерями тепла, то есть связано с недостатками, присущими обычным схемам



теплоснабжения. Более целесообразно превращать электрическую энергию в тепло децентрализованно, максимально приблизив этот процесс к потребителю.

До недавнего времени считалось, что электронагрев сопровождается перерасходом энергетических ресурсов из-за потерь при двукратном преобразовании энергии топлива (сначала в электрическую на электростанции, а затем в тепловую в электротермической установке). Однако в результате всесторонних исследований установлено, что при электронагреве первичные энергоресурсы, наоборот, часто экономятся.

Вообще, масштабы использования электрической энергии для теплоснабжения меняются во времени. Для каждого этапа развития науки и техники, электротехнической промышленности, энерго- и электроснабжения существует наиболее эффективный оптимальный уровень электрификации тепловых процессов в сельском хозяйстве. Данный уровень для конкретного отрезка времени определяется на основании технико-экономического расчета с учетом сложившихся цен.

При этом в круг вопросов, которые должны решаться при выборе оптимального варианта электротеплоснабжения, кроме традиционных технологических, технических и экономических, входят также вопросы, связанные с изменением качества и количества производимой сельхозпродукции при различных системах теплоснабжения. Кроме того, необходимо учитывать социальные и экологические аспекты широкой электрификации тепловых процессов в сельском хозяйстве:

1) повышение продуктивности животноводства и птицеводства, снижение падежа животных и удельного расхода кормов. При технико-экономическом сравнении вариантов теплоснабжения необходимо учитывать эффект, который дает более “гибкий” энергоноситель - электричество. Отечественный и зарубежный опыт эксплуатации электроотопительных установок показывает, что использование

электрической энергии позволяет с большой точностью поддерживать необходимые микроклиматические условия в помещениях, на 15...20% увеличить суточные приросты при откорме скота, снизить на 20...25% расход кормов, снизить на 10...15% - падеж молодняка и увеличить на 30% яйценоскость кур;

2) в быту сельских жителей приближение образа жизни к городскому с точки зрения повышения комфортности, уменьшения трудозатрат и зависимости от особенностей традиционных систем теплоснабжения;

3) благотворное влияние микроклимата на строительные конструкции животноводческих помещений, на технологическое, электросиловое и осветительное оборудование;

4) высвобождение работников, обслуживающих мелкие котельные и огневые установки;

5) выравнивание суточных и сезонных графиков электрической нагрузки. Использование тепловых нагрузок в качестве потребителей-регуляторов электрических графиков является чрезвычайно эффективным. В сельском хозяйстве коэффициенты использования установленной мощности и коэффициенты заполнения суточных графиков весьма низки, как в зимнее, так и в летнее время. Применение электрической энергии в тепловых процессах способствует выравниванию общего электропотребления хозяйств и лучшему использованию электросетевого оборудования, тем более что инструкция №127 от 26.01.93 «О порядке согласования применения электрокотлов и других электронагревательных приборов» устанавливает, что электрические нагревательные установки должны работать, как правило, в часы провалов графиков нагрузок энергосистемы, в основном в ночное время, и комплектоваться тепловыми аккумуляторами;

6) уменьшение стоимости передачи электрической энергии от районной подстанции к потребителю с увеличением электропотребления в хозяйствах при электротеплоснабжении;

7) значительное снижение трудоемкости при обслуживании систем электротеплоснабжения по сравнению с обслуживанием индивидуальных и групповых систем;

8) высокая фондоотдача, так как именно этот показатель для электроотопительного оборудования в сельском хозяйстве в 2...3 раза выше, чем другого какого-либо оборудования.

## **1.2. Термины и определения электротермии**

В электротермии, как и в любой другой прикладной науке, имеется определённая, узаконенная соответствующими ГОСТами (ГОСТ 22622-77, СТ МЭК 50 (841) – 83), система терминов и определений.

**Электрический нагрев (электронагрев)** – раздел науки и техники, изучающий преобразование электроэнергии в термическую энергию для полезных целей.

**Электротермический эффект** – выделение или поглощение тепловой энергии, обусловленное продольным градиентом температуры при протекании электрического тока через однородный проводник.

**Косвенный электронагрев** – процесс электронагрева, при котором образуемое тепло передаётся нагревательному материалу.

**Прямой электронагрев** – процесс электронагрева, при котором ток проходит через нагреваемый материал.

**Дуговой нагрев** – метод нагрева, в котором тепло производится главным образом одной или несколькими электрическими дугами.

**Индукционный нагрев** – нагрев тел в электромагнитном поле, осуществляемый за счёт явлений электромагнитной индукции.

**Инфракрасный нагрев** – метод нагрева, основанный на передаче энергии инфракрасным излучением.

**Диэлектрический нагрев** – метод нагрева, при котором тепло в основном генерируется в неэлектропроводном теле за счёт движения электрических зарядов на атомном или молекулярном уровне под воздействием электрического поля в диапазоне частот от 1 МГц до 300 МГц.

**Нагрев сопротивлением** – метод нагрева, в котором теплота образуется эффектом Джоуля-Ленца в электрическом проводнике, соединённом непосредственно с источником электроэнергии.

**Нагрев токами сверхвысокой частоты** – метод нагрева, при котором тепло, в основном генерируется молекулярным движением и ионной проводимостью в неэлектропроводном материале под действием электромагнитных волн в диапазоне частот между 300 МГц и 300 ГГц (длины волн от 1 м до 1 мм).

**Плазменный нагрев** – метод нагрева, использующий тепловые и/или электрические свойства ионизированного газа.

**Электротермическое оборудование (ЭТО)** – устройство, комплект технологических устройств для преобразования электроэнергии в тепловую.

**Электротермическая установка (ЭТУ)** – установка, состоящая из электротермического, электрического и механического оборудования, необходимого для её работы и применения.

**КПД ЭТУ** – отношение энергии, преобразованной в полезную теплоту, ко всей электроэнергии, подводимой для получения этой полезной теплоты.

**Индуктор электронагревателя (печи)** – конструктивный узел, включающий индуктирующий провод.

**Камера для нагрева** – замкнутая нагреваемая область печи, в которой выполняется термообработка.

**Нагревательный элемент** – деталь, съёмная или несъёмная, содержащая нагревательный проводник и приспособления, которые образуют самостоятельное устройство.

**Нагревательный кабель (провод)** – кабель (провод) с жилами высокого электрического сопротивления, предназначенный для обогрева различных объектов.

**Электрод** – токопроводящая деталь, предназначенная для осуществления контакта со средой, имеющей малую удельную проводимость.

### **1.3. Закономерности преобразования электрической энергии в тепловую**

Электрический нагрев – это нагрев тел или вещества с использованием электрической энергии. При электрическом нагреве в материале создаётся электрическое поле. Способы его образования могут быть различными.

1) Электрическое поле в проводнике создаётся при непосредственном его подключении к источнику Э.Д.С. Под действием поля свободные заряды (ионы, электроны) начинают перемещаться. Сталкиваясь с нейтральными атомами и молекулами, они отдают запас кинетической энергии, который расходуется на увеличение теплового движения частиц, и температура вещества повышается.

2) Электрическое поле в проводнике, расположенном в индукторе, наводится переменным магнитным полем. Наведённое электрическое поле вызывает движение свободных зарядов, энергия которых, как и в первом случае, превращается в теплоту.

3) Электрическое поле в диэлектрике, находящемся в конденсаторе, вызывает движение связанных зарядов, которые под влиянием электрического поля смещаются один относительно другого только в некоторых пределах. Смещение происходит с «трением», что приводит к выделению теплоты.

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

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

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

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

## 1.4. Классификация электротермических установок

Электротермические установки (ЭТУ) классифицируют по следующим признакам: 1) по роду тока; 2) по частоте тока; 3) по способам теплопередачи; 4) по технологическому назначению; 5) по способу превращения электрической энергии в тепловую и другим признакам; 6) по напряжению питания; 7) по рабочей температуре.

Классификация электротермических установок по способу превращения электрической энергии в тепловую (рис. 1): 1) нагрев сопротивлением; 2) нагрев электрической дугой; 3) нагрев в переменном магнитном поле – индукционный способ; 4) нагрев в переменном электрическом поле – диэлектрический способ; 5) нагрев электронным пучком; 6) нагрев квантами (инфракрасный, лазерный способы нагрева); 7) плазменный нагрев.



Рис. 1. Классификация электротермических установок по основным, применяемым способам превращения электрической энергии в тепловую энергию

Классификация электротермических установок по роду тока: 1) постоянного тока; 2) переменного тока.

Классифицируют электротермические установки **по частоте тока**: 1) промышленной частоты (50 Гц); 2) повышенной частоты; 3) высокой частоты; 4) сверхвысокой частоты.

**По виду нагрева** электротермические установки можно разделить на 2 группы: 1) прямого нагрева; 2) косвенного нагрева.

Электротермические установки **по режиму работы** делят на 2 группы: 1) непрерывного действия; 2) периодического действия.

**По рабочей температуре** электротермические установки классифицируют на: 1) низкотемпературные (до 500...600<sup>0</sup>С); 2) среднетемпературные (до 1250<sup>0</sup>С); 3) высокотемпературные (свыше 1250<sup>0</sup>С).

Электротермические бывают **напряжением**: 1) до 1кВ; 2) свыше 1кВ; 3) безопасного напряжения.

**По технологическому назначению** электротермические установки классифицируют на: 1) универсальные; 2) специальные.

### **1.5. Задачи и содержание проектирования электротермических установок**

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

Задача такого проектирования – создание действующего электротермического оборудования, которое обеспечивает данный технологический процесс с максимальным использованием возможности установок и минимальные приведённые затраты, создаёт условия для наибольшей производительности труда обслуживающего персонала,



соответствует правилам техники безопасности, 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.

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.

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

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

**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.

В рассматриваемом курсе более подробно будут рассмотрены вопросы теплового и электрического расчёта электротермических установок.

**Контрольные вопросы и задания.** 1. Дайте определение понятию «Электротермия». 2. На какие группы делятся сельскохозяйственные потребители теплоты? 3. Что изучает «Электротермия»? 4. Какой энергетический баланс в сельском хозяйстве? 5. Перечислите преимущества электротермического оборудования по сравнению с установками традиционного нагрева. 6. Назовите примеры использования электротермических процессов в сельскохозяйственном производстве. 7. Какие термины и определения используются в «Электротермии»? 8. Перечислите виды нагрева, способы и закономерности преобразования электрической энергии в тепловую. 9. По каким признакам классифицируются электротермические установки? 10. Назовите виды и задачи расчетов электротермических установок.

## РАЗДЕЛ 2. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЁТ ЭТУ

### 2.1. Основы динамики электронагрева

Процессы нагрева электротермических установок, их отдельных элементов и нагреваемых материалов являются динамическими. Рассмотрим процесс изменения температуры электротермической установки или нагреваемого материала во времени. Для простоты допустим, что:

- 1) электротермическая установка или нагреваемый материал представляют собой однородные тела и обладают бесконечно большой теплопроводностью, поэтому температура во всех их точках одинакова; тепловой поток в окружающую среду пропорционален разности температур электротермической установки  $t_{\text{эту}}$  или материалов  $t_{\text{м}}$  и окружающей среды  $t_{\text{окр}}$  (т.е. превышению температуры  $\theta$ :  $\theta = t_{\text{эту}} - t_{\text{окр}} = t_{\text{м}} - t_{\text{окр}}$ );
- 2) теплоёмкость  $C$ , теплоотдача  $\alpha F$  и мощность  $P$  электротермической установки или материала от температуры не зависят;
- 3) температура окружающей среды в процессе разогрева не изменяется.

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

$$P \cdot d\tau = c \cdot d\theta + \alpha \cdot F \cdot \theta \cdot d\tau, \quad (2.1)$$

где  $P \cdot d\tau$  – подводимая тепловая энергия или теплота, выделяющаяся в нагревателе установки;  $c \cdot d\theta$  – часть теплоты, выделяющаяся в материале (и идущая на повышение его температуры) или запасаемая в элементах электротермической установки;  $\alpha \cdot F \cdot \theta \cdot d\tau$  – часть теплоты, рассеиваемая в окружающую среду.

Разделив переменные, получим:

$$d\tau = \frac{c \cdot d\theta}{P - \alpha \cdot F \cdot \theta}. \quad (2.2)$$

Время нагрева  $\tau$  – один из параметров, определяющий режим нагрева материала или электротермической установки.

Проинтегрировав выражение (2.2) и определив постоянную интегрирования из нулевых начальных условий получим, что время нагрева равно:

$$\tau = \frac{c}{\alpha \cdot F} \cdot \ln \frac{P}{P - \alpha \cdot F \cdot \theta}. \quad (2.3)$$

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

$$T = \frac{c}{\alpha \cdot F} = \frac{c_m \cdot M}{\alpha \cdot F}. \quad (2.4)$$

Тогда выражение (2.3) примет вид:

$$\tau = T \cdot \ln \frac{P}{P - \alpha \cdot F \cdot \theta}. \quad (2.5)$$

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

$$\theta = \frac{P}{\alpha \cdot F} \cdot (1 - e^{-\tau/T}) = \theta_{уст} (1 - e^{-\tau/T}). \quad (2.6)$$

При  $\tau = \infty$  превышение температуры принимает установившиеся значение

$$\theta_{уст} = \frac{P}{\alpha \cdot F}. \quad (2.7)$$

Практически же установившийся режим наступает при  $\tau = (4...5)T$ .

Если же разогрев идёт не из холодного состояния, то формула (2.6) примет вид:

$$\theta = \theta_{уст} (1 - e^{-\tau/T}) + \theta_o \cdot e^{-\tau/T}. \quad (2.8)$$

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

$$\theta = 0,63 \cdot \theta_{уст}. \quad (2.9)$$

На основании выражения (2.9) постоянную времени нагрева  $T$  можно определить как промежуток времени, за который превышение температуры достигает значения  $0,63 \cdot \theta_{уст}$ .

При отключении ЭТУ материал и сама установка охлаждаются и тогда уравнение (2.1.) можно переписать в виде:

$$c \cdot d\theta + \alpha F \cdot \theta \cdot d\tau = 0. \quad (2.10)$$

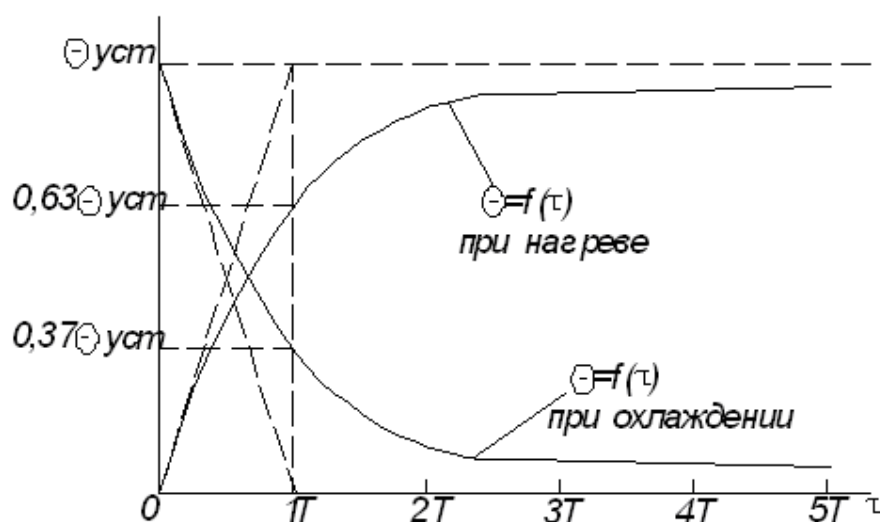
Если охлаждение начинается с установившегося значения превышения температуры  $\theta_{уст}$ , то уравнение (2.10.) имеет решение:

$$\theta = \frac{P}{\alpha \cdot F} \cdot e^{-\tau/T} = \theta_{уст} \cdot e^{-\tau/T}. \quad (2.11)$$

В выражении (2.11.) величину  $T$  следует называть постоянной времени охлаждения. При  $\tau = T$  превышения температуры достигает значения:

$$\theta = 0,37 \cdot \theta_{уст}. \quad (2.12)$$

Временные характеристики процессов нагрева и охлаждения:



**Рис. 2.1. Характер изменения превышения температуры во времени при нагреве и охлаждении**

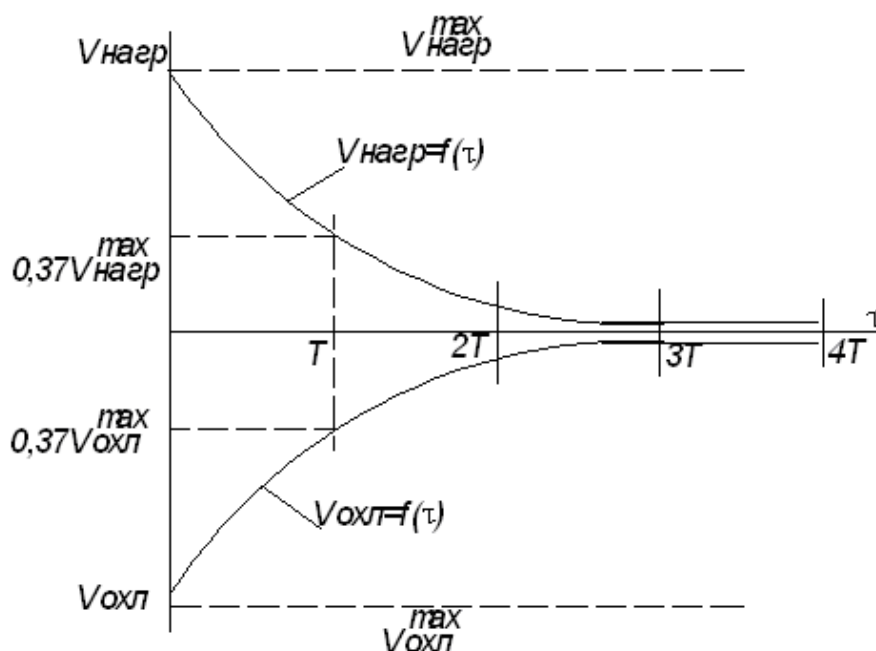
Экспоненциальный характер изменения превышения температуры при нагреве и охлаждении свидетельствует о том, что их скорости

изменяются во времени. Для определения скорости нагрева и охлаждения продифференцируем выражения (2.6) и (2.11) по времени:

$$V_{наг} = \frac{d\theta}{d\tau} = \frac{\theta_{уст}}{T} e^{-\tau/T}. \quad (2.13)$$

$$V_{охл} = \frac{d\theta}{d\tau} = -\frac{\theta_{уст}}{T} e^{-\tau/T}. \quad (2.14)$$

Из анализа уравнений (2.13) и (2.14) видно, что  $V_{наг}$  и  $V_{охл}$  экспоненциально убывают до нуля через  $t = \infty$ , а практически через время равное  $5T$ .



**Рис. 2.2. Характер изменения во времени скорости нагрева и охлаждения**

Скорость нагрева ограничивается технологическими требованиями, например, исключением возможности порчи нагреваемых материалов, что особенно важно при тепловой обработке сельскохозяйственной продукции (сушка зерна, пастеризация молока, запаривание кормов).

Динамика превышения температуры и скорости нагрева влияет на энергетические показатели процесса и тепловой КПД. В рассматриваемом случае он определяется отношением полезно израсходованной энергии к затраченной, т.е.:

$$\eta_m = \frac{c \cdot d\theta}{P \cdot d\tau}. \quad (2.15)$$

С учётом ранее выведенных уравнений:

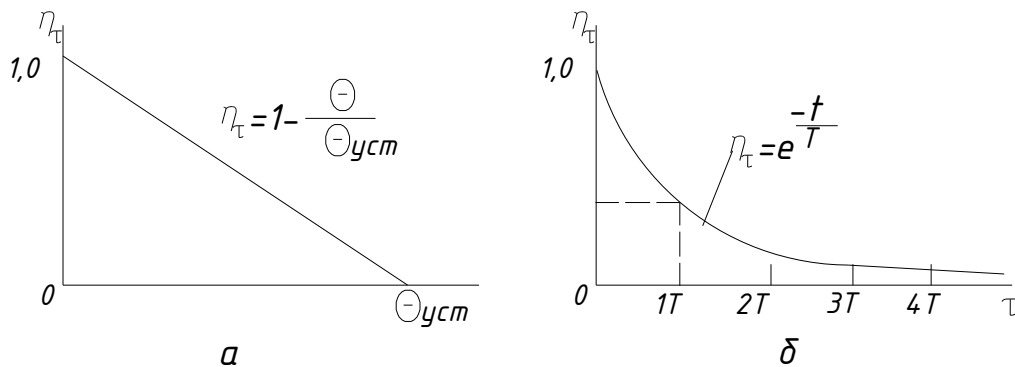
$$\eta_m = 1 - \frac{\theta}{\theta_{уст}}. \quad (2.16)$$

Выражение (2.16) представляет собой уравнение прямой, которая представляет собой спадающую линию, начинающуюся в начале нагрева со значения  $\eta_m = 1,0$ , а в конце нагрева термический КПД становится равным нулю.

$$\eta_m = e^{-\tau/T}. \quad (2.17)$$

Из анализа формулы (2.17) видно, что термический КПД в функции времени убывает экспоненциально от единицы в начале нагрева до нуля при достижении  $\theta_{уст}$ , когда вся подводимая мощность передаётся в окружающую среду.

Графики, раскрывающие сущность формул (2.16) и (2.17) имеют следующий вид:



**Рис. 2.3. Зависимость термического КПД от превышения температуры (а) и времени нагрева (б)**

## 2.2. Уравнение теплового баланса

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

В общем случае тепловая энергия в электротермической установке полезно расходуется на: 1) нагрев или фазовое преобразование материала (например, испарение, плавление); 2) нагрев вспомогательных устройств (например, упаковка, тара).

Тепловая энергия безвозвратно расходуется или теряется, что характерно для всех электротермических установок.

Тепловая энергия в электротермическую установку поступает от электрических нагревателей, от различного технологического и электротехнического оборудования (электродвигатели, лампы накаливания и т.п.), а также от биологических объектов животного и растительного происхождения.

Исходя из всего выше перечисленного, уравнение теплового баланса запишется в виде:

$$\Sigma Q_{noc} = \Sigma Q_{pac} , \quad (2.18)$$

где  $\Sigma Q_{noc}$  – суммарные поступления тепловой энергии, Дж;  $\Sigma Q_{pac}$  – суммарный расход тепловой энергии, Дж.

или 
$$Q_{эн} + Q_{б} + Q_{зо} = Q_{пол} + Q_{всп} + Q_{пот} , \quad (2.19)$$

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



## 2.3 Определения мощности и основных конструктивных размеров электротермической установки

Мощность электротермической установки может быть определена по следующему выражению:

$$P_{уст} = \frac{k_z \cdot P_{номр}}{\eta_{э} \cdot \eta_{т}}, \quad (2.20)$$

где  $k_z$  – коэффициент запаса;  $P_{номр}$  – потребляемая мощность, Вт;  $\eta_{э}$  – электрический к.п.д. установки;  $\eta_{т}$  – тепловой (термический) к.п.д. установки.

Коэффициент запаса ( $k_z = 1,1..1,3$ ) учитывает уменьшение фактической мощности электротермической установки вследствие снижения питающего напряжения, старения материалов нагревателей, а также возможное отклонение условий эксплуатации от расчётных значений.

Потребная электротермической установкой мощность:

$$P_{номр} = P_{пол} + P_{всп} + P_{ном}, \quad (2.21)$$

где  $P_{пол}$  – полезная тепловая мощность, Вт;  $P_{всп}$  – мощность, идущая на нагрев вспомогательных устройств, Вт;  $P_{ном}$  – мощность тепловых потерь, Вт.

Для электротермической установки периодического действия полезная теплота:

$$Q_{пол} = V \cdot \rho \cdot c \cdot (t_2 - t_1), \quad (2.22)$$

где  $V$  – объём материала, м<sup>3</sup>;  $\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  – удельная теплоёмкость материала, Дж/кг·°C;  $t_2$  – конечная заданная температура, °C;  $t_1$  – начальная температура материала, °C.

Полезная мощность:

$$P_{пол} = \frac{Q_{пол}}{\tau} = \frac{V \cdot \rho \cdot c \cdot (t_2 - t_1)}{\tau}, \quad (2.23)$$

где  $\tau$  – время нагрева, с.

Для электротермической установки непрерывного действия полезная теплота:

$$Q_{пол} = L \cdot \rho \cdot c \cdot (t_2 - t_1), \quad (2.24)$$

где  $L$  – объёмная подача нагреваемого материала в ЭТУ, м<sup>3</sup>/с.

Полезная мощность:

$$P_{пол} = Q_{пол} \cdot \rho. \quad (2.25)$$

В электротермических установках, в которых одновременно с нагревом происходит фазовое преобразование, при определении полезной мощности необходимо учитывать теплоту, расходуемую на нагрев материала до температуры фазового преобразования, и его теплоту.

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

$$Q_{пол} = V \cdot \rho \cdot c \cdot (t_2 - t_1) + V \cdot \rho \cdot \lambda_t, \quad (2.26)$$

где  $\lambda_t$  – удельная теплота плавления материала, Дж/кг.

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

$$Q_{пол} = V \cdot \rho \cdot c \cdot (t_2 - t_1) + V \cdot \rho \cdot r_t, \quad (2.27)$$

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

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

Тепловые потери электротермических установок связаны с тремя способами передачи теплоты: теплопроводностью, конвекцией и излучением, причём в установках передача тепла может осуществляться одновременно двумя или всеми тремя перечисленными способами. Расчёт мощности тепловых потерь проводят по формулам известным из курса «Теплотехника и термодинамика».

Теплопроводность – процесс передачи теплоты в неравномерно нагретом теле или непосредственно соприкасающихся телах, при котором теплоту переносят микрочастицы веществ, перемещающиеся из областей высокой температуры в области низких температур. В наиболее чистом виде теплопроводность проявляется внутри твёрдых монокристаллических тел или в очень тонких неподвижных слоях жидкости или газа. Теплота передаётся лишь при наличии разности температур между частями тела, системами тел и т.д., т.е. в температурном поле.

На основании гипотезы Фурье поверхностная плотность теплового потока ( $\text{Вт/м}^2$ ), передаваемого, например, через плоскую стенку определяется как:

$$\phi = \lambda \cdot \frac{\Delta t}{\delta} = \frac{\Delta t}{R_\lambda}, \quad (2.28)$$

где  $\Delta t$  – разность температур на поверхностях стенки, через которую осуществляется передача тепла,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\lambda$  – теплопроводность материала стенки,  $\text{Вт/м}\cdot^{\circ}\text{C}$ ;  $\delta$  – толщина стенки, м;  $R_\lambda$  – термическое сопротивление теплопроводности стенки,  $\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C/Вт}$ .

Конвекция – процесс переноса теплоты текущей жидкостью или газом из области с одной температурой в область с другой температурой. Конвективный теплообмен между поверхностью твердого тела одной температуры и потоком жидкости или газа с другой температурой называют конвективной теплоотдачей. Различают теплоотдачу при вынужденном движении жидкости или газа (вынужденная конвекция) и при свободном движении (естественная конвекция).

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

$$\Phi = \alpha \cdot F \cdot \Delta t = \alpha \cdot F \cdot (t_c - t_{жс}), \quad (2.29)$$

где  $\Delta t$  – разность температур на стенке  $t_c$  и потока жидкости (или газа)  $t_{жс}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $\text{Вт/м}^2\cdot^{\circ}\text{C}$ ;  $F$  – площадь поверхности теплообмена,  $\text{м}^2$ .

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

Плотность теплового потока ( $\text{Вт/м}^2$ ), передаваемого от излучателя, имеющего температуру  $T_1$ , к нагреваемому телу с температурой  $T_2$ , определяют по формуле закона Стефана-Больцмана:

$$\phi = 5.7 c_{np} \cdot \left( \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right) = \frac{\Delta t}{R_c}, \quad (2.30)$$

где  $\Delta t = (t_1 - t_2)$  – разность температур излучателя  $t_1 = (T_1 - 273)$  и нагреваемого тела  $t_2 = (T_2 - 273)$ , °C;  $R_c$  – термическое сопротивление излучению,  $\text{м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$ .

Термическое сопротивление излучению:

$$R_c = \frac{\Delta t}{5.7 c_{np} \cdot \left( \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right)}. \quad (2.31)$$

Проектирование технологических электротермических установок обычно начинают с нахождения размера их рабочего пространства (зоны или той её части, в которой размещается нагреваемый материал). При создании электротермической установки нагревательные элементы целесообразно располагать ближе к рабочему пространству.

Для электротермической установки периодического действия рабочее пространство определяется числом одновременно нагреваемых изделий, их размерами или объёмом (массой) материала, нагреваемого за один рабочий цикл.

Производительность электротермической установки периодического действия:

$$L = \frac{V \cdot \rho}{\tau}, \quad (2.32)$$

где  $\tau$  – полное время работы установки, включая время загрузки и разгрузки.

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

$$L = v \cdot \rho \cdot F, \quad (2.33)$$

где  $v$  – скорость поступления материала в рабочее пространство, м/с;  $F$  – площадь сечения рабочего пространства, м<sup>2</sup>.

Длина рабочего пространства:

$$l = \frac{L \cdot \tau}{\rho \cdot F}, \quad (2.34)$$

где  $\tau$  – время нахождения материала в рабочем пространстве установки.

## 2.4. Определение теплового КПД и удельного расхода электрической энергии

Общий КПД электротермических установок:

$$\eta_{общ} = \eta_{\varepsilon} \eta_{т}. \quad (2.35)$$

Электрический КПД зависит главным образом от способа электронагрева:

1. Нагрев методом сопротивления -  $\eta_{\varepsilon} \approx 1,0$ ;
2. Электродуговой нагрев -  $\eta_{\varepsilon} \approx 1,0$ ;
3. Индукционный нагрев -  $\eta_{\varepsilon} = 0,5 - 0,7$ ;
4. Диэлектрический нагрев (установки ВЧ) -  $\eta_{\varepsilon} = 0,4 - 0,5$ ;
5. Диэлектрический нагрев (установки СВЧ) -  $\eta_{\varepsilon} = 0,7$ .

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

Из выражения (2.16) следует, что при увеличении превышения температуры термический КПД уменьшается. Из формулы (2.17) видно, что уменьшение время нагрева (т.е. повышение скорости нагрева),

приводит к увеличению термического КПД. Повысить значение термического КПД ( $\eta_m$ ) также можно, увеличив постоянную времени нагрева  $T$ , т.е. снизив теплоотдающую способность установки. Для этого нужно применять более качественную теплоизоляцию или увеличивать её толщину, или уменьшать площадь ограждающей поверхности, так как:

$$T = \frac{V \cdot \rho \cdot c}{\alpha \cdot \pi} = \frac{\rho \cdot c}{\alpha \cdot F_{y\partial}}, \quad (2.36)$$

где  $V$  – рабочий объём ЭТУ, м<sup>3</sup>;  $\rho$  – плотность нагреваемого материала, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  – удельная теплоёмкость материала, Дж/кг·°С;  $F$  – площадь поверхности ограждения, м<sup>2</sup>;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи через ограждающую поверхность;  $F_{y\partial} = F/V$  – удельная площадь ограждения, 1/м.

Для повышения термического КПД ( $\eta_m$ ) электротермические установки проектируют таким образом, чтобы удельная площадь ограждения ( $F_{y\partial}$ ) была бы минимальной.

Для практических расчётов термический КПД можно определить по формулам:

$$\eta_m = \frac{Q_{пол}}{Q_{пол} + Q_{всп} + Q_{ном}}, \quad (2.37)$$

или

$$\eta_m = \frac{P_{пол}}{P_{пол} + P_{всп} + P_{ном}}, \quad (2.38)$$

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

Удельный расход электрической энергии на единицу объёма определяют по формуле:

а) для установок периодического действия:

$$\omega = \frac{P_{уст} \cdot \tau}{V}. \quad (2.39)$$

б) для установок непрерывного действия:

$$\omega = \frac{P_{уст}}{L} . \quad (2.40)$$

## 2.5. Выбор тепловой изоляции

Тепловая изоляция предназначена для снижения потерь теплового потока в окружающую среду. Уменьшить потери теплоты, и следовательно, увеличить КПД электротермических установок можно двумя способами: 1) увеличить толщину изоляции; 2) применить изоляцию с меньшей теплопроводностью.

Вид изоляции обуславливается её стоимостью, температурными режимами, окружающей средой, санитарно – гигиеническими условиями и др.

Требования, предъявляемые к тепловой изоляции, многогранны и противоречивы: она должна быть как можно дешевле, тоньше, легче, обладать достаточной механической прочностью, малой теплопроводностью и электрической проводимостью, выдерживать высокие температуры.

Практически ни один материал не удовлетворяет всем этим требованиям в полной мере. Поэтому тепловую изоляцию делают многослойной. Слой изоляции, прилегающий к нагревателю, выполняют из термостойкого материала. Его назначение – снизить температуру до уровня, который может выдерживать следующий слой тепловой изоляции, имеющий меньшую теплопроводность  $\lambda$ .

Выбор материала каждого слоя и его толщины есть технико-экономическая задача по определению минимума приведенных затрат. Рассмотрим методику её решения на примере однослойной тепловой изоляции.

Приведенные затраты:

$$Z = \frac{\Delta T}{R_T} \cdot c_T \cdot \tau_{II} + (c_a + E) \cdot c_{II} \cdot R_T \cdot \lambda_{II}, \quad (2.41)$$

где  $\Delta T$  – разность температур, К;  $R_T$  – термическое сопротивление, К/Вт;  $c_T$  – стоимость тепловой энергии, руб/Дж;  $\tau_{II}$  – продолжительность работы установки в году, с;  $c_a$  – коэффициент, учитывающий издержки на амортизацию и ремонт, 1/год;  $E$  – нормативный коэффициент эффективности капиталовложений, 1/год;  $c_T$  – оптовая цена тепловой изоляции, руб/м<sup>3</sup>;  $\lambda_{II}$  – теплопроводность изоляции, Вт/м·К.

Возьмём производную  $dZ/dR$  и, приравняв её нулю, найдём экономически целесообразное термическое сопротивление:

$$R_{\Delta T} = \frac{\Delta T \cdot c_T \cdot \tau_{II}}{\sqrt{(c_a + E) \cdot c_{II} \cdot R_T \cdot \lambda_{II}}}. \quad (2.42)$$

Оптимальная толщина тепловой изоляции выбранного вида:

$$\delta_{\Delta T} = R_{\Delta T} \cdot \lambda_{II}. \quad (2.43)$$

Из анализа уравнений видно, что при заданных режимах электротермической установки ( $\Delta T$  и  $\tau_u$ ) толщина тепловой изоляции тем больше, чем больше её теплопроводность и меньше оптовая цена. Толщина изоляции должна быть больше и при более высокой стоимости тепловой энергии.

## 2.6 Схемы включения нагревательных элементов и способы регулирования мощности электротермических установок

Нагревательные элементы электротермических установок рассчитаны на конкретное значение мощности и напряжения. Чтобы обеспечить номинальный режим, нагревательные элементы подключают к питающей сети соответствующего напряжения.

В процессе работы электротермической установки мощность электрических нагревателей можно регулировать, например, изменяя напряжение питания  $U_n$  или сопротивление нагревателя  $R_n$ . Наиболее



просто мощность регулировать ступенчато, переключая нагревательные элементы электротермических установок на различные схемы соединения. При этом изменяются либо число подключенных к сети элементов и их общее сопротивление, либо напряжение на каждом из них.

Нагреватели мощностью до 1 кВт обычно выполняют однофазными, а свыше 1 кВт - трёхфазными.

Однофазные нагревательные установки с регулируемой мощностью имеют два или более нагревательных элемента (секции). Регулируют мощность таких установок, переключением секций, включая их параллельно или последовательно. Так максимальная мощность будет у параллельно включённых секций:

$$P_{нар} = \frac{U^2}{R} = \frac{n \cdot U^2}{R_{IH}} , \quad (2.44)$$

где  $R_{IH}$  – сопротивление одного нагревателя, Ом;  $n$  – число секций в электротермической установке.

В случае последовательно включённых секций электротермической установки, её мощность будет минимальной:

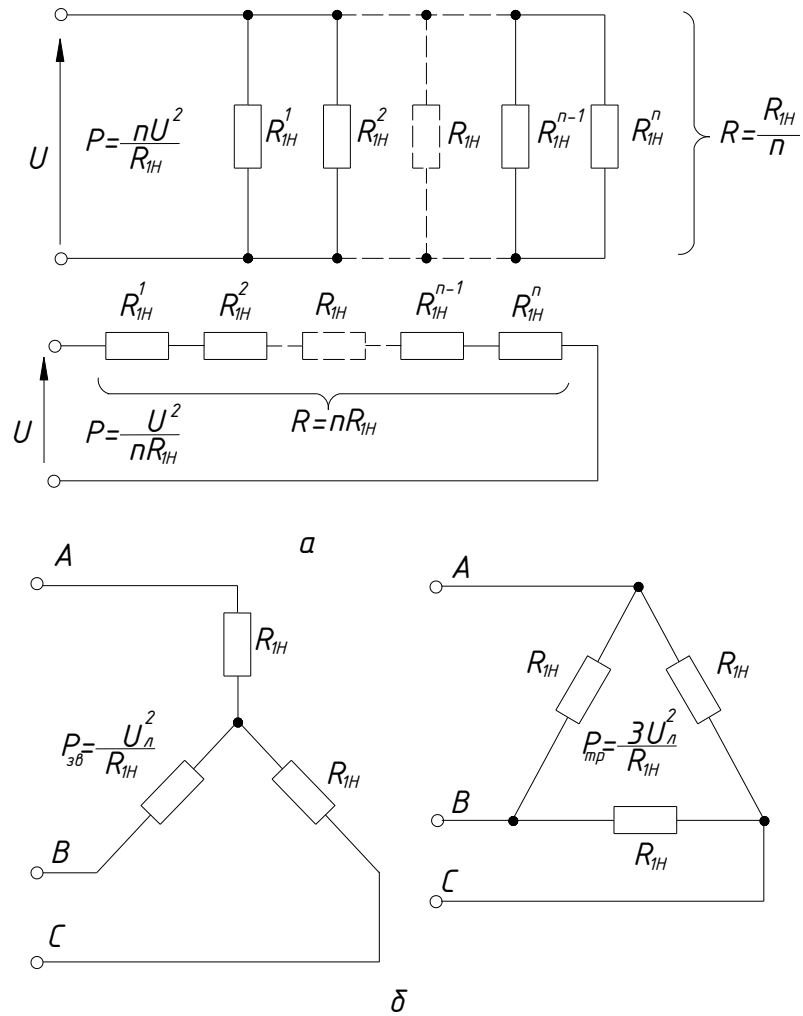
$$P_{посл} = \frac{U^2}{R} = \frac{U^2}{n \cdot R_{IH}} . \quad (2.45)$$

Отношение этих мощностей при одинаковом значении питающего напряжения составляет:

$$P_{нар} / P_{посл} = n^2 . \quad (2.46)$$

Для трёхфазных электротермических установок число секций кратно трём, поэтому с учётом того, что такое соединение представляет собой симметричную систему:

$$P = 3 \cdot P_{\phi} = 3 \cdot U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \cos \varphi . \quad (2.47)$$



**Рис. 2.4** Схемы включения нагревательных секций: а и б – одно- и трёхфазных электронагревательных устройств

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

$$P_{зв} = 3 \cdot U_{\phi} \cdot I_{\phi} = \frac{3 \cdot U_{\phi}^2}{R_{IH}} = \frac{U_{л}^2}{R_{IH}}. \quad (2.48)$$

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

$$P_{тр} = 3 \cdot U_{\phi} \cdot I_{\phi} = \frac{3 \cdot U_{л}^2}{R_{IH}}. \quad (2.49)$$

Отношение мощностей:

$$\frac{P_{mp}}{P_{3\phi}} = \frac{3}{l} . \quad (2.50)$$

Изменяя схему включения нагревательных элементов, мощность можно регулировать ступенчато, что применимо, когда не требуется точное поддержание температуры и такое регулирование называется ступенчатым.

Изменением напряжения питания  $U_{num}$  тоже можно регулировать мощность и более точно поддерживать температуру. Такое регулирование называется плавным.

## РАЗДЕЛ 3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ НАГРЕВ МЕТОДОМ СОПРОТИВЛЕНИЯ

### 3.1 Способы электрического нагрева сопротивлением

В технологических процессах широко используют электронагрев сопротивлением, при котором электрическая энергия преобразуется в тепловую непосредственно в проводящей среде или проводнике, включённым в цепь электрического тока.

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

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

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

$$Q = I^2 \cdot R \cdot \tau . \quad (3.1)$$

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

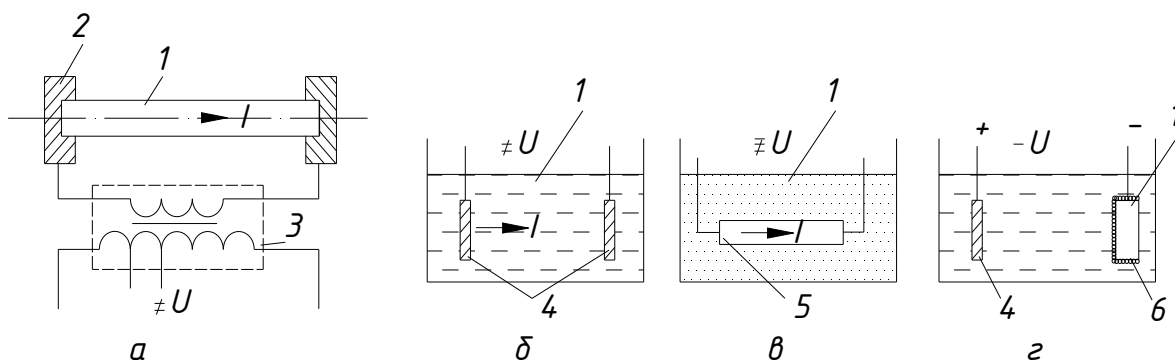
пропускания электрического тока непосредственно через нагреваемую среду или материал.

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.

**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.



**Рис. 3.1. Схемы электронагрева сопротивлением:** а – электроконтактного; б – электродного; в – косвенного (элементного); г – нагрева в электролите. На рисунках показано: 1 – нагреваемое тело; 2 – зажимы (контакты); 3 – нагревательный трансформатор; 4 – электроды; 5 – электронагреватель сопротивления; 6 – пузырьки газа.

### 3.2 Электрическое сопротивление проводников

В зависимости от характера свободных электрических зарядов принято различать проводники первого и второго рода. Под действием электрического поля в проводниках первого рода (металлы) свободные

заряды (электроны) направленно перемещаются. В проводниках второго рода (электролиты) под действием электрического поля перемещаются ионы.

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

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S}, \quad (3.2)$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление материала проводника зависит от наличия в проводнике примесей, Ом·м;  $l$  – длина проводника, м;  $S$  – площадь поперечного сечения проводника, м<sup>2</sup>.

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

$$\rho = \rho_{20}(1 + \alpha\theta + \beta\theta^2 + \gamma\theta^3 + \dots), \quad (3.3)$$

где  $\rho_{20}$  – удельное электрическое сопротивление при температуре 20<sup>0</sup> С, Ом · м;  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma = const$  – постоянные коэффициенты.

При невысоких температурах проводниковых материалов (< 300<sup>0</sup> С) можно записать:

$$\rho = \rho_{20}(1 + \alpha\theta). \quad (3.4)$$

Удельное сопротивление электролитов (проводников II рода) зависит от степени диссоциации, а сама степень диссоциации зависит от природы и концентрации электролита. Удельное сопротивление водных растворов можно определить экспериментальным путем.

С повышением температуры увеличивается степень диссоциации водных растворов, и, следовательно, изменяются удельное электрическое сопротивление и проводимость, которые можно определить по формулам (для  $\alpha = 0,025$  1/°C):

$$\left. \begin{aligned} \rho &= \frac{40 \cdot \rho_{20}}{t + 20} \\ \gamma &= \frac{\gamma_{20} \cdot (t + 20)}{40} \end{aligned} \right\} . \quad (3.5)$$

### 3.3 Электроконтактный нагрев

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

Электроконтактный нагрев деталей простой формы (валов, осей, лент) (рис. 3.1) используют при их термической и механической обработке. Деталь (заготовку) 1 включают в электрическую цепь и нагревают протекающим по ней электрическим током. Так как сопротивление детали мало, то, согласно уравнению (3.2), для нагрева необходим ток большой силы, который подводят к ней при помощи массивных медных или бронзовых зажимов (контактов) 3 и 4.

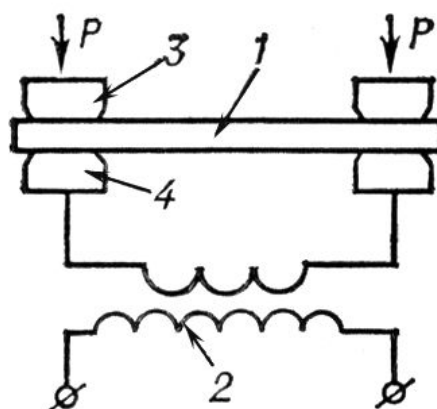


Рис. 3.2. Простейшая схема установки для электроконтактного нагрева

Количество теплоты при электроконтактном нагреве, выделяемое в единицу времени, т.е. мощность:

$$P = U \cdot I = I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R} . \quad (3.6)$$

Так как сопротивление металлических тел с хорошей проводимостью небольшое, для прямого их нагрева требуются значительные токи (сотни и тысячи ампер) при напряжении всего  $U = 5 \dots 25 \text{ В}$ . Поэтому для этих целей применяют переменный ток благодаря относительной простоте получения низкого напряжения. Но при протекании переменного тока у металлических деталей появляется поверхностный эффект, заключающийся в неравномерном распределении плотности тока по сечению проводника, которая экспоненциально уменьшается по направлению к его оси, т.е.

$$j_x = j_m \cdot e^{-x/z_0} , \quad (3.7)$$

где  $j_x$  – плотность тока в слое проводника на расстоянии  $x$  от поверхности,  $\text{А/мм}^2$ ;  $j_m$  – плотность тока в слое проводника на поверхности проводника,  $\text{А/мм}^2$ ;  $Z_0$  – эквивалентная глубина проникновения тока, м.

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

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

$$z_0 = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r \cdot f}} , \quad (3.8)$$

где  $\mu_r$  – магнитная проницаемость материала проводника.

Если нагрев осуществляется на частоте  $f = 50 \text{ Гц}$ , то

$$z_0 = 71.2 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r}} . \quad 3.9$$

Для каждого металла эквивалентная глубина проникновения тока  $z_0$  имеет своё значение.



Для сквозного нагрева принципиально может быть использован так же и постоянный ток.

### 3.4 Расчёт и выбор нагревательных трансформаторов

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

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

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

$$P_{пол} = \frac{m \cdot c \cdot (t_2 - t_1)}{\tau}, \quad (3.10)$$

а общая потребная мощность:

$$P_{общ} = \frac{P_{пол}}{\eta} = \frac{P_{пол}}{\eta_m \cdot \eta_{\varepsilon}}, \quad (3.11)$$

где  $\eta = 0,55 \dots 0,82$

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

Среднее значение вторичного напряжения за время нагрева:

$$U_2 = \sqrt{R_{\sim} \cdot P_{общ}}, \quad (3.12)$$

где  $R_{\sim}$  – среднее значение сопротивления детали на переменном токе за время нагрева, Ом.

Тогда:

$$S_{TP} = \frac{P_{общ}}{\eta_{TP} \cdot \cos \varphi} \sqrt{ПВ}, \quad (3.13)$$

где  $\eta_{TP} = 0,9...0,95$ ;  $\cos \varphi = 0,6...0,85$  – средний  $\cos \varphi$ ; **ПВ** – относительная продолжительность включения.

Так как нагревательные трансформаторы обычно работают в повторно-кратковременном режиме, поэтому продолжительность включения можно определить по формуле:

$$ПВ = \frac{\tau_p}{\tau_{ц}} = \frac{\tau_p}{\tau_p + \tau_{паузы}}. \quad (3.14)$$

Электроконтактный нагрев применяют главным образом для деталей, имеющих одинаковое сечение по длине. При этом термический КПД может быть определён по формуле:

$$\eta_m = \frac{P_{пол} \cdot R_{\sim}}{U_2^2} = \frac{P_{пол} \cdot \left[ \frac{\rho \cdot l}{S} \right]}{U_2^2}. \quad (3.15)$$

Значение термического КПД  $\eta_m$  зависит от геометрических размеров нагреваемой заготовки, чем выше отношение длины  $l$  детали к поперечному сечению  $S$ , тем выше  $\eta_m$ .

Мощность нагрева регулируют изменением подводимого к заготовке напряжения. Для этого первичную, а иногда и вторичную обмотки нагревательного трансформатора разделяют на секции. Необходимую мощность получают включением секции по определённой схеме.

### 3.5 Электроконтактная сварка

При электроконтактной сварке нагрев производят пропусканием через место сварки тока достаточной величины. При такой сварке места соприкосновения деталей нагреваются до температуры плавления путём пропускания через них электрического тока. Переходное сопротивление в

месте соприкосновения деталей значительно превосходит значения их сопротивлений, поэтому сами детали от тока нагреваются очень мало, тогда как в стыках выделяется большое количество энергии.

Количество теплоты, выделяемое в местах сварки, пропорционально сопротивлению контакта стыка.

Переходное сопротивление электрического контакта:

$$R_n = k_i \cdot k_T / (0,1F)^m, \quad (3.16)$$

где  $k_i$  – коэффициент зависящий от материала свариваемых деталей;  $F$  – усилия сжатия, приложенное к контакту, Н;  $m$  – показатель степени, зависящий от формы поверхностей контактирующих деталей;  $k_T$  – коэффициент учитывающий температуру контакта.

$$k_T = 1 + 0,67\alpha_T / (T_k - 293), \quad (3.17)$$

где  $\alpha_T$  – температурный коэффициент сопротивления контактов,  $K^{-1}$ ;  $T_k$  – температура контакта, К.

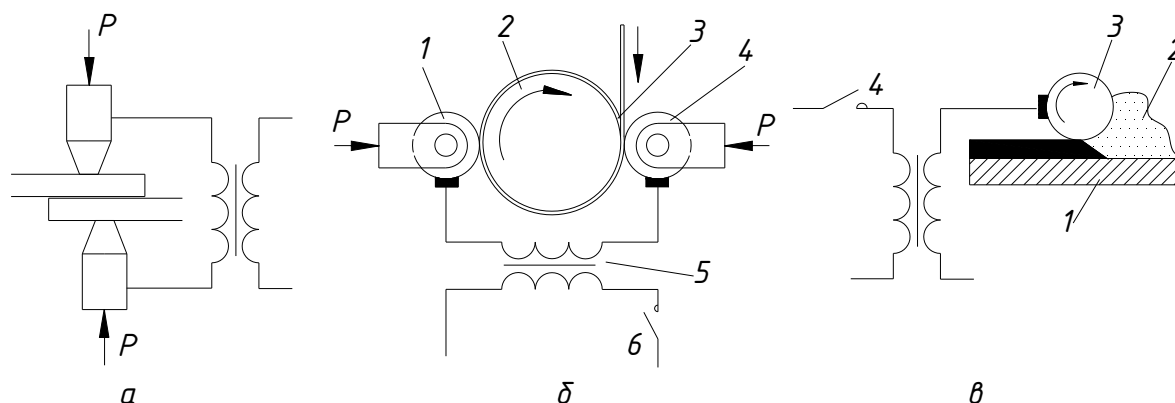


Рис. 3.3. Электроконтактная сварка: а) точечная; б) роликовая (при наплавке, приварке) в) роликовая (при припекании)

Различают сварки: 1) стыковую; 2) точечную; 3) роликовую.

**Стыковая сварка** подразделяется на два вида: с оплавлением и без оплавления.

При сварке без оплавления детали с обработанными концами приводят в соприкосновение и сжимают значительными усилиями. После этого через детали пропускают ток. За счет контактного сопротивления в

месте стыка возникает концентрированное выделение тепла и при достижении определенной температуры пластические свойства металла становятся достаточными для сварки. При окончании цикла сварки сначала снимают ток, потом осадочное давление.

При стыковой сварке оплавлением нагрев деталей производится до полного оплавления их поверхностей (стыков). Процесс имеет 3 стадии: предварительный подогрев, оплавление, окончательная осадка (либо только 2 последние стадии).

В начальный момент детали сжимают для обеспечения надежного контакта и пропускают электрический ток. Таким образом, обеспечивают быстрый разогрев до необходимой температуры (для стали 600-800 °С). После этого давление некоторым образом снижают. Соответственно увеличивается сопротивление контакта и сварной ток падает. Ухудшение контакта приводит к тому, что линии тока концентрируются в этот период времени в немногих точках соприкосновения. В этих точках концентрируются большие мощности, и начинается оплавление. Контактирующие выступы разрушаются. Весьма скоро оплавляется поле свариваемой поверхности. После этого увеличивают осадочное давление и детали можно сварить. При этом избыток расплавленного металла выдавливается из контакта.

Грат (венчик) содержит большое количество окислов. Он механически непрочен и легко удаляется со сваренного стыка. Сварка плавлением имеет ряд преимуществ по сравнению со сваркой без оплавления. Она дает гораздо большую прочность шва, не требует предварительной зачистки торцов детали, позволяет сваривать сечения сложной формы, детали из разнородных металлов.

Недостатком такого вида сварки является потеря металла с гратом.

Стыковая сварка применяется для сварки проволоки, арматуры, всевозможных колец, ободов, цепей, труб, рельсов. Большое значение данный вид сварки имеет в производстве твердоплавленного инструмента.

**Точечная сварка.** Наиболее распространенный способ контактной сварки. Применяется для сварки различных полос, листов небольшой толщины (5...6 мм). Наиболее распространен цикл, когда в течение всей сварки давление не меняется. Однако лучшие результаты получают в том случае, если в конце сварки повышается осадочное давление.

Повышение давления (перед повышением давления ток снимают) называется праковкой. Она предупреждает непровар и образование раковин в точках сварки.

Машины точечной сварки имеют высокую производительность. Они могут давать до 600 точек в минуту. При такой производительности трудно коммутировать сварочный ток и выдерживать необходимую длительность его протекания. Лишь в самых простейших машинах используют механические переключатели или контакторы с эффективным дугогашением.

Применение бесконтактных силовых выключателей, построенных на газоразрядных приборах или на кремниевых тиристорах существенно повышают эффективность коммутации сварочного тока. Совокупность бесконтактного выключателя и электронного реле времени называют бесконтактным прерывателем.

**Роликовая (шовная) сварка.** Различают три режима такой сварки:

1) С непрерывным движением роликов и непрерывной подачей тока (не применяется, так как дает сварку низкого качества). Применение способа возможно лишь при очень больших скоростях сварки, когда в каждый полупериод питающего тока сваривается одна точка.

2) С непрерывным движением роликов и импульсной подачей тока. Наиболее распространен.

3) С прерывистым движением роликов. Ток подается только в моменты остановки.

Машины для роликовой сварки отличаются от точечных машин наличием подвижных электродов (роликов), снабженных механизмом электропривода и более напряженным режимом работы. Машины снабжают бесконтактными прерывателями.

Шовная сварка позволяет соединить плотным швом непроницаемые для жидкостей и газов листы металла небольшой толщины (от доли мм до 5...6 мм).

### **3.6 Электродный нагрев. Материалы электродов**

В электродных нагревателях материал с ионной проводимостью, заключённый между электродами, образует проводник, в котором при протекании электрического тока выделяется теплота, используемая для нагрева воды, молока, почвы и т.д. Применяется в основном переменный ток, т.к. при постоянном токе возникает электролиз. Но и на переменном токе надо работать при небольших плотностях тока (т.к. при больших всё равно возникает электролиз), максимальное значение которых зависит от конфигурации применяемых электродных систем и их пространственного расположения.

Электродный нагрев отличается простотой реализации, высоким КПД, невысокой стоимостью материалов и оборудования. Но одновременно с этим он обладает и рядом недостатков:

- 1) нагреваться могут только электропроводящие материалы;
- 2) в процессе нагрева значительно изменяется мощность;
- 3) повышенная электроопасность;

4) под действием проходящего тока изменяется качество нагреваемого материала, что не допустимо, например, для продуктов питания.

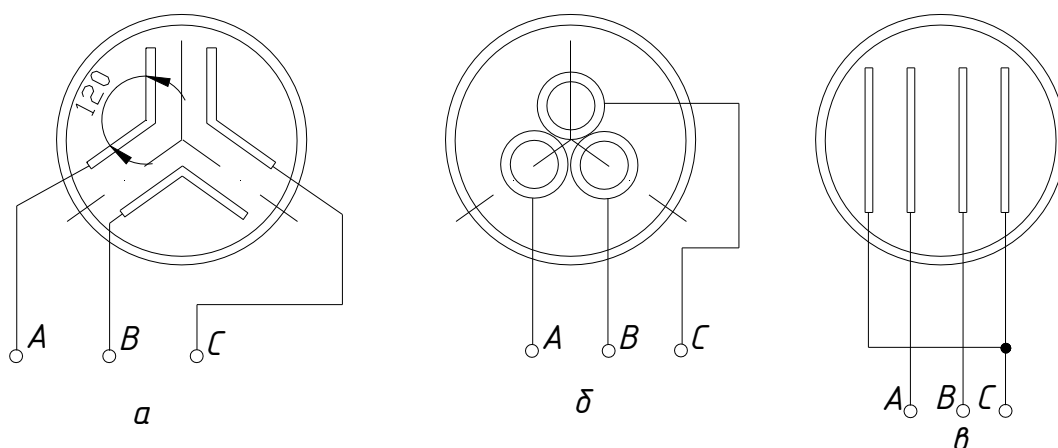
В качестве материала электродов можно использовать различные проводники, но они должны противостоять коррозии и не давать токсичных оксидов. Поэтому используют следующие материалы: 1) для технических целей: конструкционную сталь и латунь; 2) для пищевых целей: графит, нержавеющую сталь и титан.

В нагревателях небольшой мощности используют пару плоских электродов, в мощных – трёхфазные системы, состоящие из нескольких электродов.

Наиболее распространены электродные системы (см. рис. 3.4):

- а) из электродов изогнутых под углом  $120^0$ ;
- б) из коаксиальных (цилиндрических) электродов;
- в) из плоских электродов, но для обеспечения симметричной нагрузки питающей сети принимают число электродов равное  $3n+1$ , где  $n$  – целое число.

Схема замещения зависит от конструкции систем и способности материала ёмкости (бака) проводить электрический ток. Если ёмкости изготовлены из электроизоляционного материала, то схемы замещения соединения электродных систем рис. 3.4 «а» и «б» представляют собой «треугольник», а «в» – «звезду». В том случае если используются электропроводящие емкости, то все схемы замещения – «звёзды».



**Рис. 3.4. Электродные системы изготовленные: а – из электродов, изогнутых под углом 120°; б - из коаксиальных цилиндрических электродов; в - из плоских электродов**

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

$$P = \frac{U^2 \cdot \gamma \cdot S}{l}, \quad (3.18)$$

где  $U$  – межэлектродное напряжение, В;  $\gamma$  – удельная электрическая проводимость,  $\text{См} \cdot \text{м}^{-1}$ ;  $S$  – площадь электрода,  $\text{м}^2$ ;  $l$  – расстояние между электродами, м.

Так как  $U = \text{const}$ ,  $S = \text{const}$  и  $l = \text{const}$ , а изменяется только удельная электрическая проводимость  $\gamma$  в процессе нагрева, то с учётом формулы (3.5) мощность в зависимости от температуры нагрева можно определить как (для  $\alpha = 0,025 \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ):

$$P = P_{20} \cdot \frac{(t + 20)}{40}. \quad (3.19)$$

При закипании воды мощность нагревателя снижается, т.к. уменьшается удельная электрическая проводимость за счёт образования пузырьков.



### 3.7 Допустимая плотность тока на электродах и напряжённость электрического поля

Так как электропроводность большинства материалов, подлежащих электродному нагреву, объясняется наличием в них воды, то максимальная плотность тока на электродах и в соприкасающихся с ними объёмах нагреваемого материала ограничивается условиями недопустимости процесса электролиза. Предельная плотность тока  $j_{\partial on}$  ( $A/cm^2$ ) не приводящая к электролизу, зависит от конструкции электродных систем. Для плоских электродов  $j_{\partial on} = 0,5 A/cm^2$  или определяется по формуле:

$$J_{\partial on} = \frac{16}{\sqrt{\rho_2}}, \quad (3.20)$$

где  $\rho_2$  – удельное электрическое сопротивление нагреваемого материала при температуре  $t_2$ , Ом·м

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

В электротермических установках периодического действия при  $U = const$  плотность тока не остаётся постоянной в процессе нагрева. Она возрастает из-за уменьшения удельного электрического сопротивления ( $\rho$ ) при увеличении температуры. В электротермических установках непрерывного действия плотность тока ( $j$ ) изменяется только в первоначальный период, т.е. когда стабилизируется температура выходящего из нагревателя продукта. Плотность тока определяется значением удельного электрического сопротивления при напряжении  $U = const$ ; площади электродов  $S = const$  и расстоянии между электродами  $l = const$ . Напряжённость электрического поля в нагреваемом материале, зависящая от  $U$  и  $l$ , во время работы остаётся неизменной. Для плоскопараллельных электродов:

$$j = \frac{U}{\rho \cdot l}. \quad (3.21)$$

Для коаксиальных цилиндров:

$$j = \frac{U}{\rho \cdot r \cdot \ln(r_1 / r_2)} , \quad (3.22)$$

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

Связь между напряжённостью электрического поля  $E$  и плотностью тока  $j$ :

$$E = j \cdot \rho . \quad (3.23)$$

Для плоскопараллельных электродов:

$$E = \frac{U}{l} . \quad (3.24)$$

Для коаксиальных цилиндров:

$$E = \frac{U}{r \cdot \ln(r_1 / r_2)} . \quad (3.25)$$

Из формулы 3.22 и 3.25 видно, что значения напряжённости электрического поля и плотности тока минимальны на внешнем электроде и максимальны на внутреннем.

Фактически:

$$E_{\text{дон}} \geq E_{\text{max}} ,$$
$$E_{\text{дон}} = \frac{E_{\text{np}}}{1.5 \dots 2} \geq E_{\text{max}} . \quad (3.26)$$

Таким образом: значение максимальной напряжённости электрического поля  $E_{\text{max}}$  не должно превышать значения пробивной напряжённости  $E_{\text{np}}$  нагреваемого материала. Значение пробивной напряжённости  $E_{\text{np}}$  зависит от плотности материала.

### 3.8 Расчёт электродных нагревательных устройств

При расчёте электродных нагревательных устройств определяют потребную мощность и конструктивные параметры электродной системы.

Потребную мощность находят с учётом технологических условий, которые характеризуют производственный процесс.

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

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

И тогда:

$$P_{\text{номр}} = \frac{P_{\text{пол}}}{\eta_m} . \quad (3.27)$$

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.

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{t_1 + 20}{t_2 + 20} . \quad (3.28)$$

$$P_{\text{номр}} = \frac{P_1 + P_2}{2} . \quad (3.29)$$

Мощность  $P_2$  определяется как

$$P_2 = \frac{2P_{\text{номр}}}{1 + \left( \frac{t_1 + 20}{t_2 + 20} \right)} . \quad (3.30)$$

Расчётная мощность:

- для однофазных нагревателей:

$$P_{\text{расч}} = P_2 . \quad (3.31)$$

- для трёхфазных нагревателей:

$$P_{расч} = \frac{1}{3} P_2 . \quad (3.32)$$

Расчётный ток нагревателя:

$$I_{расч} = \frac{P_{расч}}{U} . \quad (3.33)$$

При использовании нагревателей в виде двух плоскопараллельных пластин, размещённых в ёмкости из электроизоляционного материала (при  $j < j_{дон}$ ) рабочая площадь,  $\text{см}^2$ , каждого из электродов:

$$S = \frac{I_{расч}}{j} . \quad (3.34)$$

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:

$$l = \frac{U^2 \cdot S}{\rho_2 \cdot P_{расч}} , \quad (3.35)$$

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 (3.26).

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:

$$d_1 = d_2 \cdot e^{2\pi \cdot h \cdot U^2 / P_{расч} \cdot \rho_2} . \quad (3.36)$$

Межэлектродное расстояние:

$$l = \frac{d_1 - d_2}{2} . \quad (3.37)$$

Действительную напряжённость электрического поля  $E$  определяют по (3.25) и проверяют по условию (3.26).

При расчёте однофазных нагревателей непрерывного действия:

$$P_{расч} = P_{номр} . \quad (3.38)$$

Для трёхфазных:

$$P_{расч} = \frac{1}{3} P_{номр} . \quad (3.39)$$

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

$$\rho_{ср} = \frac{40 \rho_{20}}{t_{ср} + 20} , \quad (3.40)$$

где

$$t_{ср} = \frac{t_1 + t_2}{2} . \quad (3.41)$$

### **3.9. Косвенный электронагрев сопротивлением. Требования к материалам нагревательных элементов и их конструкции**

Основным узлом ЭТУ, реализующим косвенный нагрев методом сопротивления, являются нагревательные элементы. Материал нагревательных элементов выбирают в зависимости от значения рабочей температуры ( $t_{раб}$ ) и условий работы. Эти материалы, прежде всего, должны быть: 1) жаростойкими; 2) жаропрочными; 3) технологичными.

Кроме перечисленных, добавляются так же специфические требования, обусловленные особенностями работы электронагревательных элементов:

1. Жаростойкость, т.е. они не должны окисляться под действием кислородного воздуха, высоких температур.

2. Достаточная жаропрочность может быть невелика, достаточно, чтобы нагреватели поддерживали сами себя.

3. Большое удельное сопротивление. Это объясняется тем, что тонкие и длинные нагреватели не прочны, не удобны конструктивно, имеют малый срок службы.

4. Малый температурный коэффициент сопротивления (ТКС). Это необходимо для того, чтобы сократить пусковые толчки тока. Толчки могут достигать 4...5 кратного значения и длиться длительное время из-за большой инерционности печи.

5. Электрические свойства нагревателей должны быть постоянны.

6. Нагреватели должны иметь постоянный размер.

7. Материалы должны хорошо обрабатываться.

Основные материалы, из которых изготавливаются нагревательные элементы ЭТУ – это, прежде всего, следующие сплавы:

- хромникелевые (нихромы);
- хромалюминиевые (фехрали);
- хромникельалюминиевые (нихром с алюминием).

Наиболее применяемые и отвечающие требованиям это нихромы: Х20Н80; Х15Н60; Х25Н20; Х23Н18 и т.д. Чем больше никеля в сплаве, тем выше его качество и рабочая температура, но одновременно с этим они и дороже.

У фехралей более низкая стоимость, но прочность при высоких температурах хуже. Более высокая прочность у фехралей - хромникельалюминиевые сплавы (Х15Н60Ю3А).

В ЭТУ с рабочими температурами  $t_{раб} > 1250^{\circ}C$  применяют неметаллические нагреватели из графита, тугоплавких металлов и т. д. Температурный коэффициент сопротивления нагревателей, изготовленных из обычной стали, большой, жаростойкость и жаропрочность невысокие, сопротивление зависит от значения протекающего по ним тока. Однако, они дешевы и недефицитны, поэтому их применяют для ЭТУ низкотемпературного нагрева (300...400<sup>0</sup>С).

Нагревательные элементы по конструктивному исполнению разделяются на: 1) открытые; 2) закрытые; 3) герметические.

1) Открытые электронагреватели изготавливают из металлических сплавов в виде ленты или проволоки, свёрнутых в спираль или зигзагообразно. Их крепят на керамических жаропрочных изоляторах в рабочем пространстве ЭТУ. Теплота передаётся конвекцией и излучением. Чем выше температура нагрева, тем большая часть энергии инфракрасного излучения передаётся нагреваемому материалу.

2) Закрытый нагреватель находится в защищённой оболочке. Теплота передаётся в основном конвекцией. Следует также отметить, что открытые и закрытые нагреватели просты по конструкции и имеют невысокую стоимость, но меньше срок службы.

3) Герметические нагреватели или ТЭН.

### 3.10 Трубчатые электрические нагреватели

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

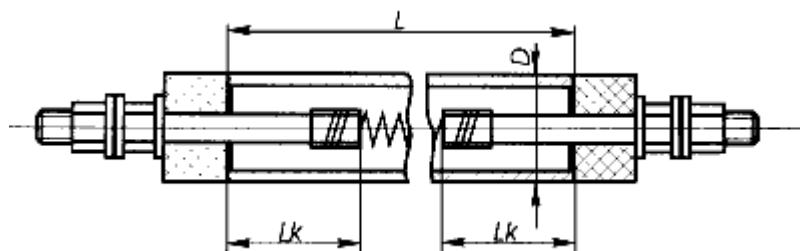


Рис. 3.5 ТЭН, где показано:  $D$  - диаметр оболочки;  $L$  - развернутая длина ТЭН;  $L_k$  - длина контактного стержня в заделке

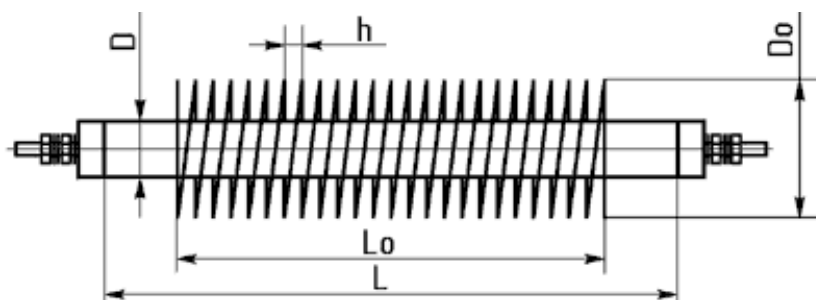
ТЭН состоит из (рис.3.5): 1) тонкостенной металлической трубки (оболочки); 2) нагревательной спирали, изготовленной из проволоки с большим удельным электрическим сопротивлением; 3) наполнителя (периклазкристаллический оксид магния, или кварцевый песок); 4)

контактных стержней; 5) изоляторов; 6) креплений. Контактные стержни и проходные изоляторы надёжно герметизируют термовлагостойким лаком.

В качестве материала оболочки обычно используют: 1) медь; 2) латунь; 3) углеродистая и нержавеющая сталь.

Для рационального размещения ТЭНов в рабочей зоне электротермической установке им придают различную форму (см. Приложение 1) и устанавливают при помощи крепёжных устройств (штуцеров, планок и т.п.).

При нагреве газообразных сред для увеличения теплоотдачи от ТЭНов применяют их оребрение (рис. 3.6), выполняемое из материала с хорошей теплопроводностью (см. Приложение 1). Применение такого конструктивного решения способствует сокращению габаритных размеров ЭТУ, и следовательно, их металлоёмкости.



**Рис. 3.6 Оребрённый ТЭН, показано:  $L$  – развернутая длина;  $L_0$  – длина оребрения;  $D$  – диаметр оболочки;  $D_0$  – диаметр оребрения;  $h$  – шаг оребрения.**

Марки наиболее распространенных ТЭНов, их конструкция и типоразмеры приведены в Приложении 1.

Основным параметром, характеризующим ТЭН, является удельная поверхностная мощность  $P_{y\partial}$ , Вт/см<sup>2</sup>:

$$P_{y\partial} = \frac{P}{\pi \cdot D \cdot l_a} . \quad (3.42)$$

Предельное значение  $P_{y\partial}$  ТЭНа определяется условиями работы, допустимыми температурами поверхности спирали, наполнителя и



оболочки. Для определения числа нагревателей (необходимо помнить, что  $n$  – должно быть кратным трём):

$$n = \frac{P_{ЭТУ}}{P_I}. \quad (3.43)$$

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

### 3.11 Электрический и конструктивный расчёты нагревательных элементов

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

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

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

$$P_H = \frac{U_H^2}{R_H} = \frac{U_H^2 \cdot S}{\rho \cdot l}, \quad (3.44)$$

а также уравнение теплообмена при теплопередаче:

- теплопроводностью

$$P_H = \lambda \cdot (t_2 - t_1) \cdot \frac{F_T}{l} = P_{удт} \cdot F_T. \quad (3.45)$$

- конвекцией

$$P_H = \alpha_k \cdot (t_2 - t_1) \cdot F_k = P_{удк} \cdot F_k. \quad (3.46)$$

- излучением

$$P_H = 5.7 c_{np} \cdot \left( \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 \right) \cdot F_u = P_{уди} \cdot \alpha_I \cdot F_u, \quad (3.47)$$

где  $\alpha_I$  – коэффициент эффективности излучения нагревателей;  $P_{удт}$ ;  $P_{удк}$ ;  $P_{уди}$  – удельные поверхностные мощности нагревателей при теплообмене теплопроводностью, конвекцией, излучением,  $Вт/м^2$ .

Удельная поверхностная мощность определяется:

$$\begin{aligned} P_{y\partial m} &= \lambda \cdot (t_2 - t_1) / l \\ P_{y\partial k} &= \alpha \cdot (t_2 - t_1) \\ P_{y\partial u} &= \omega_u \cdot \alpha_k \end{aligned} \quad . \quad (3.48)$$

Зная конкретные условия работы нагревателей можно определить  $P_{y\partial m}$ ;  $P_{y\partial k}$ ;  $P_{y\partial u}$ . Однако расчёты по формулам (3.48) носят приближенный характер.

Обозначим в общем случае удельную поверхностную мощность нагревателя  $P_{y\partial}$ , а основные размеры определяем из следующих уравнений:

$$\left. \begin{aligned} R_n &= \frac{U^2}{P_n} = \rho \cdot \frac{l}{S} \\ P_{y\partial} &= \frac{P_n}{F} = \frac{P_n}{\Pi \cdot l} \end{aligned} \right\} . \quad (3.49)$$

Тогда:

$$l = \frac{U^2 \cdot S}{P_n \cdot \rho} = \frac{P_n}{P_{y\partial} \cdot \Pi} . \quad (3.50)$$

$$\Pi \cdot S = \frac{P_n^2 \cdot \rho}{U^2 \cdot P_{y\partial}} . \quad (3.51)$$

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

$$\Pi = d \cdot \pi \quad S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} . \quad (3.52)$$

Подставив (3.52) в (3.51), можно определить диаметр нагревателя круглого сечения:

$$d = \sqrt[3]{\frac{4P_n^2 \cdot \rho}{\pi^2 \cdot U^2 \cdot P_{y\partial}}} . \quad (3.53)$$

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

$$l = \frac{R \cdot S}{\rho} = \sqrt[3]{\frac{P_n \cdot U^2}{4\pi \cdot \rho \cdot P_{y\partial}^2}} \quad (3.54)$$

Для ленточного нагревателя, у которого площадь поперечного сечения и поперечный периметр равны:

$$S = a \cdot b; \quad \Pi = 2 \cdot (a + b) = 2 \cdot (m + 1) \cdot a, \quad (3.55)$$

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

Расчётная толщина нагревателя прямоугольного сечения:

$$a = \sqrt[3]{\frac{P_n^2 \cdot \rho}{2U^2 \cdot m \cdot (1 + m)P_{y\partial}}} \quad (3.56)$$

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

$$l = \frac{R \cdot S}{\rho} = \sqrt[3]{\frac{P_n \cdot U^2 \cdot m}{4(m + 1)^2 \rho \cdot P_{y\partial}^2}} \quad (3.57)$$

При рабочей температуре  $t_{раб} > 700^\circ\text{C}$  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:

$$I = \frac{P}{U} . \quad (3.58)$$

$$t_{\text{раб}} = t_{\text{расч}} . \quad (3.59)$$

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

Таблица 3.1 Допустимые нагрузки на нихромовую неизолированную проволоку, подвешенную горизонтально в спокойном воздухе при 20 °С

Диаметр проволоки, мм	Сечение, $\text{мм}^2$	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

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:

$$t_{\text{расч}} = t_{\text{раб}} \cdot k_{\text{монтажа}} \cdot k_{\text{среды}} , \quad (3.60)$$

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.

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 проволочным 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:

$$t_{раб} = \frac{t_{расч}}{k_m \cdot k_c} \leq t_{max}, \quad (3.61)$$

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

Длину провода определяют по выражению:

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

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

Используя допуски, регламентируемые требованиями особенностей конструкции, и расчётные формулы komponуют рабочее пространство электротермической установки.

### 3.12 Особенности расчёта стальных нагревателей

В низкотемпературных электротермических процессах сельскохозяйственного производства очень часто используют нагреватели изготавливаемые из стали благодаря дешевизне и доступности этого материала для производства нагревательных элементов.

Существенным недостатком стальных нагревателей является нестабильность таких параметров, как: электрическое сопротивление, температурный коэффициент сопротивления, магнитная проницаемость. Это объясняется наличием поверхностного эффекта и внутренней индуктивности из-за чего электрическое сопротивление таких проводников из углеродистой стали на переменном токе больше, чем на постоянном. Степень влияния поверхностного эффекта зависит от геометрических размеров, удельного электрического сопротивления  $\rho$ , и магнитной проницаемости среды  $\mu$ . Из-за перечисленных выше факторов, и из-за внутренней индуктивности  $\cos \varphi$  меньше единицы ( $\cos \varphi < 1$ ).

Полное сопротивление нагревателя из стали можно определить по формуле:

$$Z = \frac{R \cdot k_n}{\cos \varphi}, \quad (3.63)$$

где  $k_n = 1 + 0,0176 d^2$  – коэффициент поверхностного эффекта (для  $d = 1 \dots 6$  мм, и удельной мощности  $P_{y\phi} = 20 \dots 100 \text{ Вт/м}$ ).

Тогда длина стального провода, используемая для нагревательного элемента, может быть рассчитана по следующей формуле:

$$l = 3 \sqrt{\frac{P \cdot U^2 \cdot \cos^2 \varphi}{4\pi \cdot \rho \cdot P_y^2 \cdot k_{II}}}. \quad (3.64)$$

### 3.13 Нагревательные провода и кабели

В низкотемпературных процессах сельскохозяйственного производства, где рабочая температура не превышает 40°C и применение других нагревателей затруднено по условиям электробезопасности, по технологическим требованиям или по другим причинам, например, для обогрева почвы и воздуха в парниках и теплицах, для обогрева пола, для прогрева водопроводов на вводе в помещения, водостоков, карнизов и др., применяют специальные электронагревательные провода и кабели. К ним относятся нагревательные провода ПОСХП, ПОСХВ, ПНВСВ, ПОСХВТ и кабели КНРПВ, КНРПЭВ, КНМСС, КМЖ, КМНС и др.

Токопроводящая жила нагревательных проводов изготовлена из оцинкованной малоуглеродистой стали диаметром 1,1 мм (ПОСХП, ПОСХВ), 1,2 мм (ПНВСВ) и 1,4 мм (ПОСХВТ). В качестве электроизоляции используют поливинилхлорид (ПОСХВ, ПОСХВТ) и полиэтилен (ПОСХП). Максимальная рабочая температура нагрева проводов типа ПОСХП составляет 70°C, ПНВСВ - 80°C, ПОСХВ - 70°C, ПОСХВТ - 105°C. При этом электрическое сопротивление проводов ПОСХП и ПОСХВ составляет 0,174 Ом/м, ПОСХВТ - 0,120 Ом/м и ПНВСВ - 0,121 Ом/м, а удельная погонная мощность не должна превышать при обогреве полов и почвы 11 Вт/м для проводов ПОСХП и ПОСХВ и 16 Вт/м – для ПОСХВТ и ПНВСВ. В проводе ПНВСВ имеется дополнительная изоляция из фторопластовой ленты, экран из стальных проволочек диаметром 0,3 мм и наружная поливинилхлоридная оболочка, что увеличивает его срок службы в 4...5 раз и безопасность в эксплуатации.

Нагревательные кабели могут иметь до трёх токопроводящих жил. Их изолируют асбестом, силиконом, кристаллическим оксидом магния, переклазом и другими теплостойкими материалами. Снаружи кабель

покрыт оболочкой из свинца, алюминия, меди, нержавеющей стали или поливинилхлоридного пластика, предохраняющей его от механических повреждений и от воздействия окружающей среды.

В сельском хозяйстве широко применяют для локального обогрева съемные электрообогревательные плиты, панели, коврики, грелки, манежи и другие устройства. В них используют нагревательные провода, кабели, угольнографитовые шнуры и ленты, а также резистивные композиционные материалы.

Нагревательные провода, кабели, ленты и другие устройства применяют в рассредоточениях тепловых процессах, относящихся к низкотемпературным ( $5...40^{\circ}\text{C}$ ) с низкой плотностью тепловых нагрузок ( $100...1000 \text{ Вт/м}^2$ ) и выполняемых на значительных площадях и на протяженности обогреваемых объектов. Область применения этих нагревательных устройств непрерывно растет. Поэтому в последнее время разработаны и изготавливаются новые типы подобных нагревателей в широком диапазоне их номенклатуры и ассортимента. К ним относятся нагревательные провода типов: ПНСФсЭФ, ПННФсЭФ, ПНМФсЭФ с удельной мощностью  $30 \text{ Вт/м}$  и максимальной температурой жилы  $200^{\circ}\text{C}$ ; ПНСВ, ПНСП, ПНСФЭВ, ПНМФЭМ, ПНМФЭВ с удельной мощностью  $20...50 \text{ Вт/м}$  и максимальной рабочей температурой  $80^{\circ}\text{C}...200^{\circ}\text{C}$  и др.

Для изготовления нагревательных секций систем электрического обогрева строительных конструкций зданий и жилых помещений предназначены нагревательные кабели марок КНМПЭВ, КННПЭВ, КННмПЭВ, КННсПЭВ, с рабочей температурой ниже  $80^{\circ}\text{C}$ ; нагревательные кабели КНЛЛЭВ, КНЛсПЭВ, КНФНФЭ с удельной мощностью  $20...40 \text{ Вт/м}$  и др.

Нагревательные кабели типа КМЖ, КМНС, КНРПВ, КНРПЭВ имеют 1...4 нагревательные жилы из стальной оцинкованной проволоки или сплавов с повышенным сопротивлением, допустимая температура



нагрева жилы 250°C, линейное сопротивление 0,11 Ом/м, удельная мощность до 109 Вт/м, напряжение 220 В.

Гибкие ленточные нагреватели (плоские кабели) марок ЭНГЛ-80, ЭНГЛ-190 допускают температуру соответственно 85 и 180°C, имеют по восемь нагревательных жил, расположенных в одной плоскости в изолирующей стекловолокнистой ленте. Лента с жилами заключена в пластиковую оболочку. Жилы могут соединяться параллельно, последовательно и т.д. Линейная мощность 40...100 Вт/м, линейное сопротивление 0,5...1,0 Ом/м. Там, где требуется высокая интенсивность нагрева, используют теплостойкие ленточные нагреватели типа НТЛ, допускающие температуру 400...600°C и линейную нагрузку 150...360 Вт/м, напряжение до 380 В.

Выпускаются также гибкие ленточные нагреватели типа ЭНГЛ-1, ЭНГЛ-2, ЭНГЛУ-400, ЭНГКЕх мощностью 0,16...5,0 кВт и температурой нагрева ленты 23...400°C. Ленточные нагреватели являются изделиями различной мощности и размеров и не подлежат резке в размер.

В настоящее время начинают широко внедряться в электронагревательных установках саморегулирующиеся кабели. Это сравнительно новое направление в области нагревательных кабелей. Их производство стало возможным в связи с разработкой пластмасс и резистивных композиционных материалов, обладающих электропроводящими свойствами, изменяющимися в зависимости от их температуры. Принцип работы саморегулирующихся кабелей следующий. Если на две токоподводящие жилы подается напряжение, по токопроводящей пластмассе начинает течь ток. Пластмасса нагревается, температура её повышается и растёт сопротивление, следовательно, уменьшается ток, а значит, уменьшается и выделяемая тепловая мощность. Процесс стабилизируется, и кабель будет выделять постоянную теплоту до тех пор, пока вновь не изменится температура кабеля, например, в

результате изменения внешней температуры. Так, кабель *devi-pipeguara* красного цвета используется для защиты от промерзания крыш и водостоков, а также для обогрева наружных площадей, удельная мощность 26 Вт/м при 10°C, сечение токоведущих жил  $2 \times 1,5 \text{ мм}^2$ , максимальная длина кабеля выбирается из тех соображений, что ток, протекающий по нему, не должен превышать 16 А. Кабель *devi-hotwatt-55* используется для поддержания необходимой температуры жидкости в технологических процессах, равной 55°C. Кабель используется совместно с терморегулятором, имеющем верхний предел ограничения температуры.

Нашли широкое применение и саморегулирующиеся нагревательные кабели ленточного типа *Heat Trace* различных модификаций *FSL.../ФЕЛ...* - промышленный саморегулирующийся электронагревательный кабель ленточного типа, предназначенный для различных условий эксплуатации, различной мощности и температуры, как нагрева, так и окружающей среды.

### 3.14. Расчет нагревательных проводов и кабелей

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  $\Delta P_{дон}$ , Вт/м. При этом должно соблюдаться условие  $\Delta P_{раб} \leq \Delta P_{дон}$ .

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

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

$$P_{расч} = U \cdot I = I^2 \cdot R = U^2 / R = I^2 \cdot \rho \cdot l / S, \quad (3.65)$$

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:

$$L_{min} = \frac{P_{расч}}{\Delta P_{доп}}. \quad (3.66)$$

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

$$U_{Iy\partial} = \sqrt{\Delta P_{доп} \cdot R_{Iy\partial}}. \quad (3.67)$$

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

$$l_c = U / U_{Iy\partial}. \quad (3.68)$$

4. Число секции на одну фазу определяют по выражению:

$$N_c = L_{min} / l_c. \quad (3.69)$$

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

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

$$P_c = P_{расч} / Z_c . \quad (3.70)$$

6. Так как мощность одной секции может быть определена как  $P_c = U^2 / Kc = U^2 / R_{l_{y\partial}} \cdot l_{рас}$  то расчетная длина секции, м, будет составлять:

$$l_{расч} = \frac{U^2}{P_c \cdot R_{l_{y\partial}}} . \quad (3.71)$$

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

$$\Delta P_{раб} = P_c / l_{расч} . \quad (3.72)$$

8. Определяют полную длину нагревателя одной фазы:

$$L_{\phi} = l_{расч} \cdot Z_c . \quad (3.73)$$

Затем определяют длину нагревателя в целом:

$$L_n = 3 \cdot L_{\phi} . \quad (3.74)$$

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

$$P_{\phi} = \Delta P_{раб} \cdot L_{\phi} , \quad (3.75)$$

а трёхфазного нагревателя:

$$P_{раб} = 3 \cdot P_{\phi} = \Delta P_{раб} \cdot L_n . \quad (3.76)$$

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

## РАЗДЕЛ 4. ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАГРЕВ

### 4.1. Свойства и характеристики электрической дуги

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 (+).

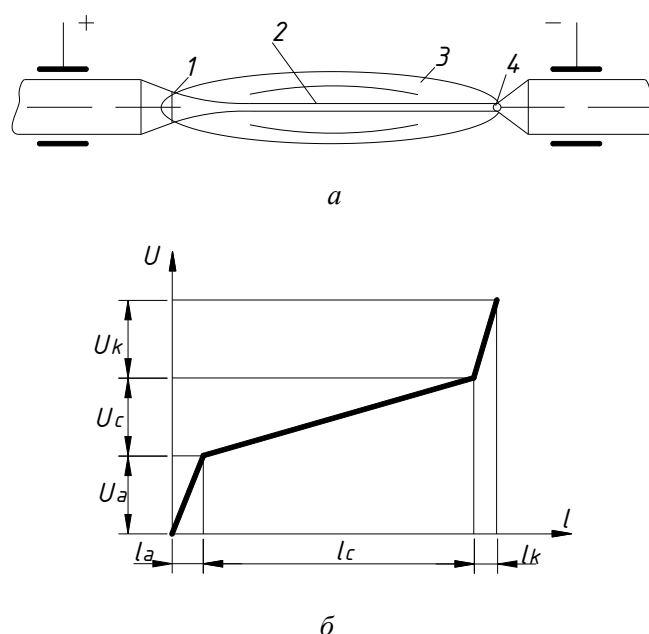


Рис. 4.1. Электрическая дуга (а) постоянного тока и распределение напряжения (б) на ее элементах: 1 – анодный кратер; 2 – столб дуги; 3 – светящаяся оболочка; 4 – катодное поле.

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

В основном столбе дуги напряженность электрического поля  $E = 1500 \dots 5000$  В/м, температура  $T_{столба} = 6000 \dots 12000$  К, а концентрация ионов –  $10^{24}$  1/м<sup>3</sup>, т.е. можно заключить, что столб дуги представляет собой плазму с очень высокой плотностью.

Горение дуги сопровождается следующими эффектами:

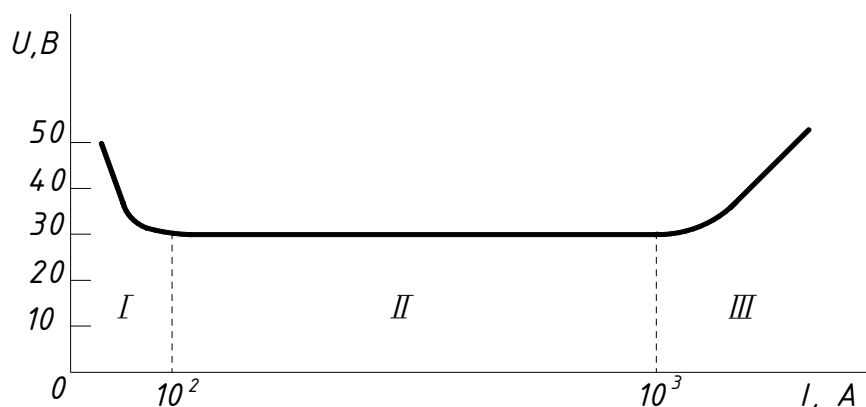
- большим выделением теплоты на электродах. На этом основана работа электродуговых печей прямого нагрева и техника электродуговой сварки;
- мощным лучистым потоком в оптическом диапазоне спектра электрических магнитных колебаний. Это свойство используется в электродуговых печах косвенного нагрева и в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

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

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

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

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



**Рис. 4.2.** Статическая вольт-амперная характеристика дуги постоянного тока

Связь общего падения напряжения  $U_2$  на дуге с падением напряжения на отдельных ее элементах в области малых токов устанавливает формула Г. Айртон:

$$U_2 = \alpha + \beta \cdot l + (\gamma + \delta \cdot l) / I_0 \quad (4.1)$$

где  $\alpha$  - суммарное анодно-катодное падение напряжения, В;  $\beta$  - градиент потенциала в столбе дуги, В/м;  $l$  — длина дуги, м;  $\gamma$  и  $\delta$  - мощности, затрачиваемые на вырывание электронов из катодного пятна, Вт/А, и на продвижение электронов в межэлектродном промежутке на единицу расстояния, Вт/(А·м);  $I_0$  - сила тока дуги, А.

В формуле (4.1) падение напряжения  $(\gamma + \delta l) / I_0$  зависит от силы тока, что соответствует падающему характеру ВАХ. Для средних токов это слагаемое мало:

$$U_A = \alpha + \beta \cdot l \quad (6.2)$$

Среда, в которой дуга горит, влияет на форму статической ВАХ. Так, в среде инертных газов даже при небольших токах характеристика дуги

возрастающая. Ее применяют при сварке в среде защитных газов, плазменно-дуговых процессах.

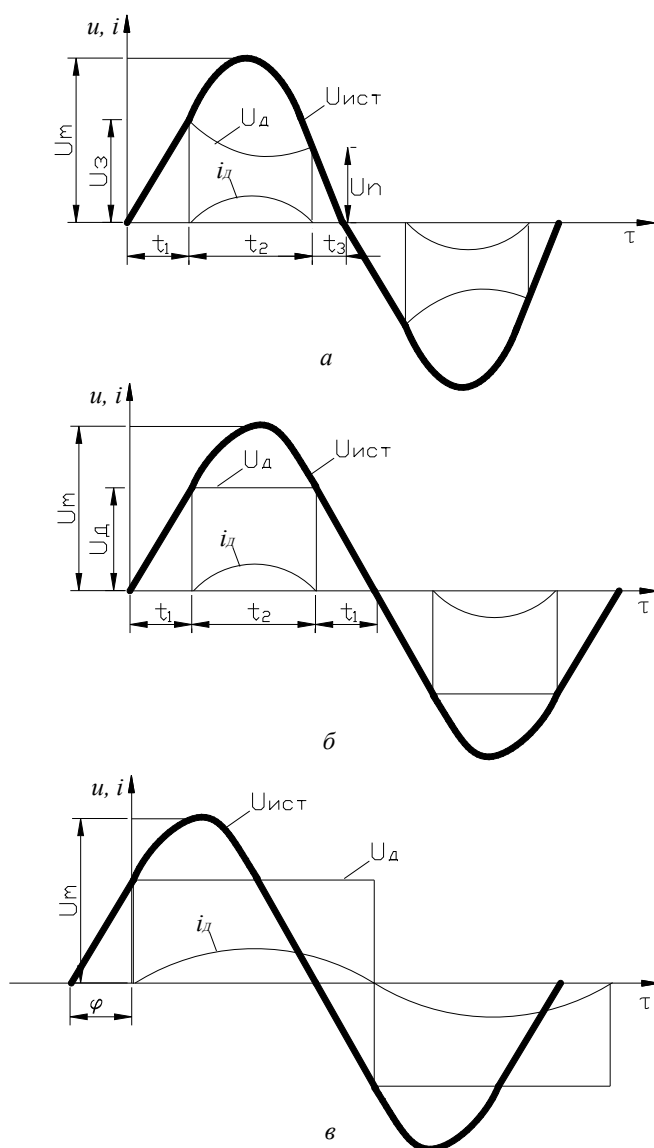
Рассмотренные явления происходят в электрической дуге постоянного и переменного тока. Статическая ВАХ на переменном токе соответствует действующим значениям тока и напряжения. При этом катодная и анодная области дуги меняются местами в зависимости от полярности приложенного напряжения. На рисунке 4.3, а показано изменение тока и напряжения при отсутствии индуктивности в цепи дуги. При напряжении  $U_{ист}$  источника питания меньше напряжения  $U_3$  зажигания дуги она не может загореться. В обычной атмосфере напряжение  $U_3$  для стальных электродов составляет 30...35 В, а для угольных – 45...55 В. Через промежуток времени  $\tau_1$  напряжение источника увеличивается до  $U_3$ , дуга зажигается и по ней протекает ток  $i_l$ . Достигнув амплитудного значения  $U_m$ , напряжение источника уменьшается и становится через промежуток времени  $\tau_2$  меньше напряжения  $U_n$  погасания дуги, она гаснет, и ток через нее прекращается. На отрезке времени  $\tau_3 + \tau_1$  дуга не горит, а затем происходят повторное ее зажигание, горение и погасание в отрицательной полуволне питающего напряжения.

Для маломощных дуг напряжение  $U_n$  погасания несколько меньше напряжения  $U_3$  зажигания. При силе тока дуги более 100 А напряжение  $U_n$  мало отличается от  $U_3$  и напряжение  $U_\delta$  горения практически не зависит от тока дуги, т.е.  $U_3 \cong U_n = U_\delta$  (рис. 4.3,б).

При включении индуктивности последовательно с дугой сдвигается ток относительно напряжения на угол  $\varphi$  (рис. 4.3,в). Изменяя значение индуктивности, можно получить такой угол сдвига фаз, что при уменьшении напряжения источника ниже напряжения горения дуги ЭДС самоиндукции, складываемая с напряжением источника, обеспечит напряжение, достаточное для поддержания горения дуги до тех пор, пока ток не перейдет через нулевое значение. В этот момент напряжение



источника будет иметь другой знак и увеличится до значения, достаточного для зажигания дуги, т.е. ток в дуге возникает без всякого перерыва. При малом значении индуктивности появляются перерывы в горении дуги, и кривая тока существенно искажается.



**Рис. 4.3.** Изменение тока  $i_d$  и напряжения  $u_d$  в контуре с активным сопротивлением маломощных (а) и мощных (б) дуг, в контуре дуги с индуктивным (в) сопротивлением

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.

## 4.2. Зажигание, устойчивость горения и регулирование тока дуги

Источник питания сварочной дуги должен обеспечивать надежное зажигание дуги, ее устойчивое горение и регулирование тока.

Первоначально дуга зажигается при соприкосновении электродов, одним из которых является изделие, и при последующем их разведении она продолжает гореть.

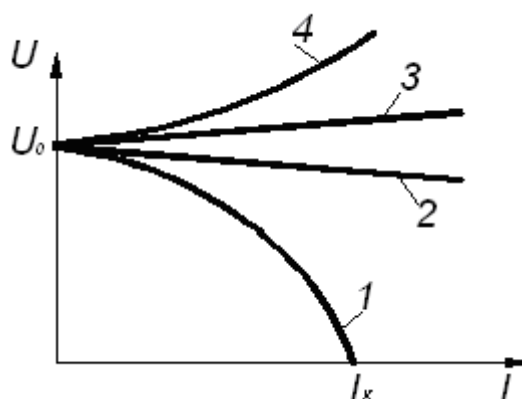


Рис. 4.4. Внешние характеристики источников питания сварочной дуги: 1 и 2 – круто- и пологопадающая; 3- жесткая; 4 – возрастающая

Основная характеристика источника – внешняя, представляющая собой зависимость между напряжением на его выходных клеммах и током, протекающим через сварочную цепь при нагрузке. Внешняя вольт-амперная характеристика (рис. 4.4) может быть крутопадающей 1, пологопадающей 2, жесткой 3 и возрастающей 4. Важным параметром источника наряду с напряжением  $U_0$  холостого хода является ток  $I_k$  короткого замыкания, который по отношению к номинальному току  $I_n$  источника обычно находится в следующих пределах:

$$1,25 < \frac{I_k}{I_n} < 2 \quad (4.3)$$

Таким образом, короткое замыкание – один из рабочих режимов при зажигании электрической дуги. Источник питания при этом должен надежно работать.

Устойчивое горение дуги обеспечивается правильным выбором внешней характеристики источника питания (рис. 4.5). При падающей статической ВАХ 2 дуги источник питания должен иметь еще более крутопадающую внешнюю характеристику 1. Равенство токов и напряжений дуги и источника в этом случае будет в точках А и В. Из них только точка А соответствует устойчивому горению дуги.

В статическом состоянии баланс напряжений в сварочной цепи имеет вид:

$$U_0 = I_{\partial} \cdot R_u + U_{\partial} , \quad (4.4)$$

где  $U_0$  - напряжение холостого хода источника питания, В;  $I_{\partial}$  - сила тока в сварочной цепи, А;  $R_u$  - сопротивление источника питания, Ом;  $U_{\partial}$  - напряжение дуги, В.

При изменении тока в сварочной цепи баланс мгновенных напряжений выглядит следующим образом:

$$u_{\partial} = i_{\partial} \cdot R_u + u_{\partial} + L \frac{di}{dt} , \quad (4.5)$$

где  $L$  — индуктивность контура сварочной цепи, Гн;  $di/dt$  — изменение мгновенного значения сварочного тока, А/с.

ЭДС самоиндукции контура с дугой:

$$L \frac{di}{dt} = u_0 - i_{\partial} \cdot R_u - u_{\partial} . \quad (4.6)$$

В точке В при увеличении тока  $I_1$  на  $\Delta I$   $L(di/dt) > 0$ . Так как  $L > 0$ , то  $di/dt > 0$ , в результате ток в цепи будет продолжать расти до значения  $I_2$ . При уменьшении тока  $I_1$  на  $\Delta I$   $L(di/dt) < 0$  и  $di/dt < 0$ , вследствие чего ток будет уменьшаться до нуля и дуга погаснет. Следовательно, режим в точке В неустойчивый.

Иначе обстоит дело в точке А. Если ток  $I_2$  возрастет на  $\Delta I$ , то в соответствии с уравнением (4.6)  $L(di/dt) < 0$  и  $di/dt < 0$ . В результате ток будет уменьшаться до значения  $I_2$ . При снижении тока  $I_2$  на  $\Delta I$   $L(di/dt) > 0$

и  $di/dt > 0$ , вследствие чего ток возрастает до прежнего значения  $I_2$ , т.е. дуга горит устойчиво.

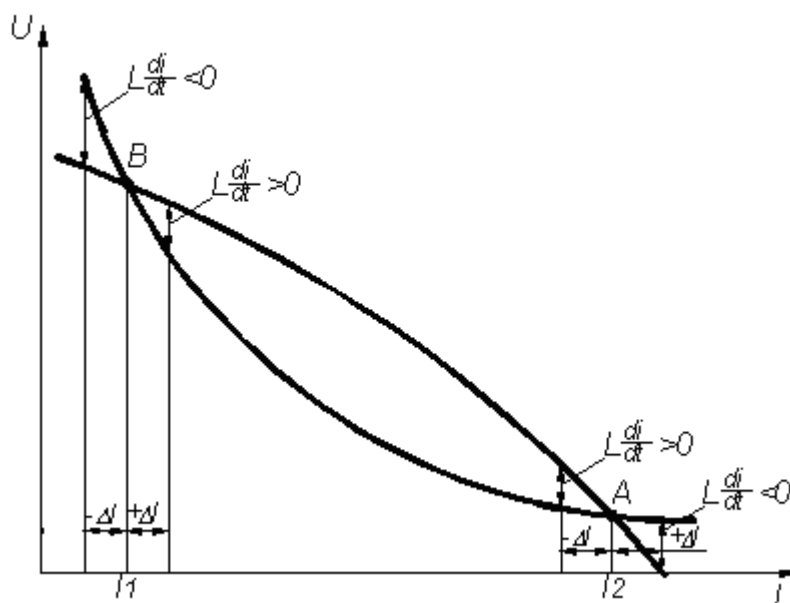
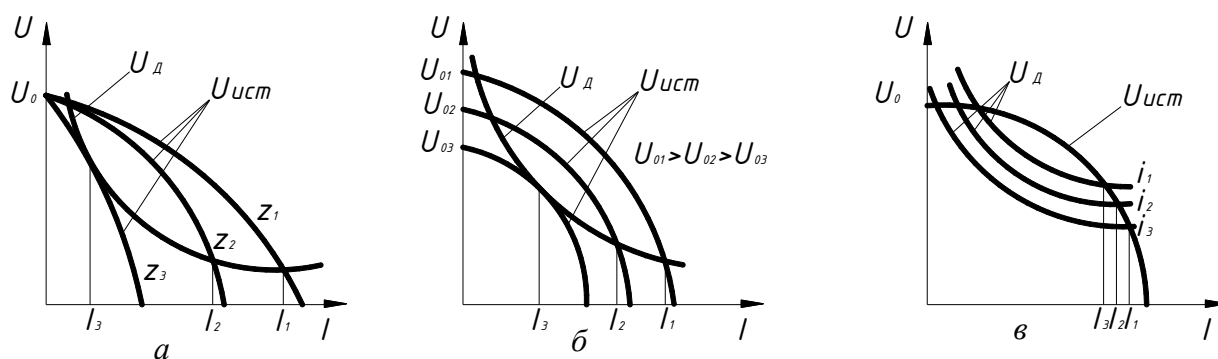


Рис. 4.5. Внешняя характеристика 1 источника питания и вольтамперная 2 дуга

При жесткой статической ВАХ устойчивое горение дуги обеспечивается при использовании источников питания с круто- и пологопадающей внешней характеристикой. При возрастающей статической ВАХ дуги применяют источники с жесткими внешними характеристиками.

Сварочный ток при питании дуги от источника с падающей ВАХ можно регулировать, изменяя полное сопротивление цепи дуги, ее длину, напряжение холостого хода источника питания.

При изменении полного сопротивления цепи дуги (рис. 4.6) можно уменьшать сварочный ток от номинального значения до значения, соответствующего пересечению статической ВАХ дуги и внешней характеристики источника. При большом полном сопротивлении цепи дуга вообще гореть не будет, так как для любого значения тока напряжение питания будет меньше напряжения, необходимого для горения дуги.



**Рис. 4.6. Регулирование тока (а) изменением полного сопротивления цепи дуги, напряжения (б) холостого хода, длины (в) дуги.**

При уменьшении напряжения холостого хода источника его внешние характеристики смещаются влево (рис. 4.6,б) и пересекаются со статической ВАХ дуги при меньших значениях тока. Очевидно, что снижать напряжение холостого хода источника можно до значений, при которых обеспечивается зажигание дуги. При увеличении ее длины статические ВАХ смещаются вверх, а точки их пересечения с внешней характеристикой источника будут соответствовать меньшим значениям тока (рис. 4.6, в). При чрезмерном увеличении длины дуга погаснет. Кроме основных требований по обеспечению надежного зажигания, устойчивости горения и регулировании сварочного тока, которые являются общими для всех источников питания сварочной дуги, к источникам переменного тока предъявляются дополнительные требования. Они связаны с их динамическими свойствами, т.е. способностью восстанавливать напряжение в соответствии с изменившимся током. Так, при погасании дуги напряжение должно быстро восстанавливаться до значения зажигания, так как в противном случае повторного зажигания может не произойти и в горении дуги наступят значительные перерывы. Для надежного повторного зажигания дуги переменного тока необходимо увеличивать сварочный ток и напряжение холостого хода источника, а также использовать источники с большой индуктивностью.

От динамических свойств источников переменного тока зависит качество сварочного шва. Быстрое нарастание тока короткого замыкания при касании капель электродного металла шва приводит к ее разбрызгиванию и ухудшению качества сварочных работ. Для устранения этого в сварочную цепь последовательно с дугой включают дроссель или применяют источники с крутопадающими характеристиками.

#### **4.3. Режимы сварки и работы источников питания сварочной дуги**

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:

$$I_{св} = K \cdot d_{эл} , \quad (4.7)$$

где  $K$  - коэффициент, зависящий от диаметра электрода и вида покрытия, А/мм;  $d_{эл}$  - диаметр электрода, мм. При этом руководствуются следующими данными:

$d$ , мм	1...2	3...4	5...6
$K$ , А/мм	25...30	30...45	45...60

Большие значения коэффициента  $K$  принимают при выполнении горизонтальных сварных швов. Для получения вертикальных швов сварочный ток уменьшают на 10...15%, а потолочных – на 15...20%.

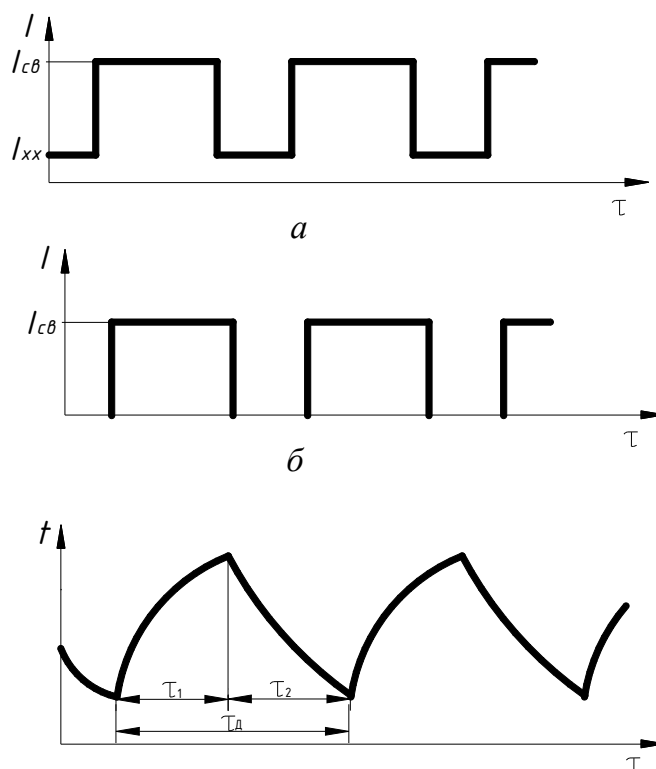
С уменьшением диаметра электрода при неизменной силе тока возрастает плотность тока, стабилизируется перемещение дуги в направлении шва, выделяющаяся теплота концентрируется на меньшей площади свариваемого металла и, следовательно, уменьшается глубина провара.

Для дуги постоянного тока можно использовать ток прямой и обратной полярности. В первом случае минус источника присоединяют к электроду, во втором – к свариваемому изделию. Ток обратной полярности применяют в тех случаях, когда требуется уменьшить выделение теплоты на свариваемом изделии.

При сварке постоянным током прямой полярности глубина провара на 10...50% меньше, а при сварке переменным током – на 15...20%, чем при сварке постоянным током обратной полярности.



Скорость сварки существенно влияет на формирование основных характеристик шва. При скорости 10...12 м/ч увеличивается провар, а при более высоких скоростях уменьшаются глубина и ширина провара.



**Рис. 4.7.** Нагрузочные графики источников питания сварочной дуги при работе (а) и отключении (б) ее на холостом ходу, изменения температуры (в) источников питания

Положение электрода при сварке может быть вертикальным, углом вперед и назад. При сварке углом назад глубина провара растет, а ширина шва уменьшается. При сварке углом вперед глубина провара уменьшается, а ширина шва увеличивается.

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.

Из графиков нагрузок источников питания дуговой сварки, показанных на рисунке 4.7, видно, что источник питания установок во время паузы соответственно работает на холостом ходу (рис. 4.7, а) и отключается (рис. 4.7, б). Из графика (рис. 4.7, в) видно, что в рабочий период температура перегрева обмоток источника повышается, а в период паузы – понижается. Такой прерывистый режим работы источника характеризуется относительной продолжительностью включения (ПВ) или относительной продолжительностью работы (ПР), выражаемыми обычно в процентах. С некоторым приближением можно считать, что:

$$ПВ = ПР = \frac{\tau_1}{\tau_1 + \tau_2} \cdot 100\% = \frac{\tau_1}{\tau_{\Sigma}} \cdot 100\% , \quad (4.8)$$

где  $\tau_1$  – время горения дуги, ч;  $\tau_2$  – время паузы или холостого хода, ч;  $\tau_{\Sigma}$  – общая продолжительность цикла, ч.

Каждый источник питания рассчитывают на номинальное напряжение и номинальный ток при определенной продолжительности работы.

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  $\tau_1$  горения дуги.

Если источник питания работает при ПР, меньшем или большем номинального (паспортного) значения, то допускаемый сварочный ток будет соответственно больше или меньше номинального:

$$I = I_n \cdot \sqrt{ПР_n / ПР} . \quad (4.9)$$

По этой же формуле можно найти допускаемое ПР, если задано значение необходимого сварочного тока.

Источники питания многопостовых установок и дуговых автоматов рассчитывают на длительный режим работы, для которого  $PR = 100\%$ .

#### **4.4. Источники питания сварочной дуги**

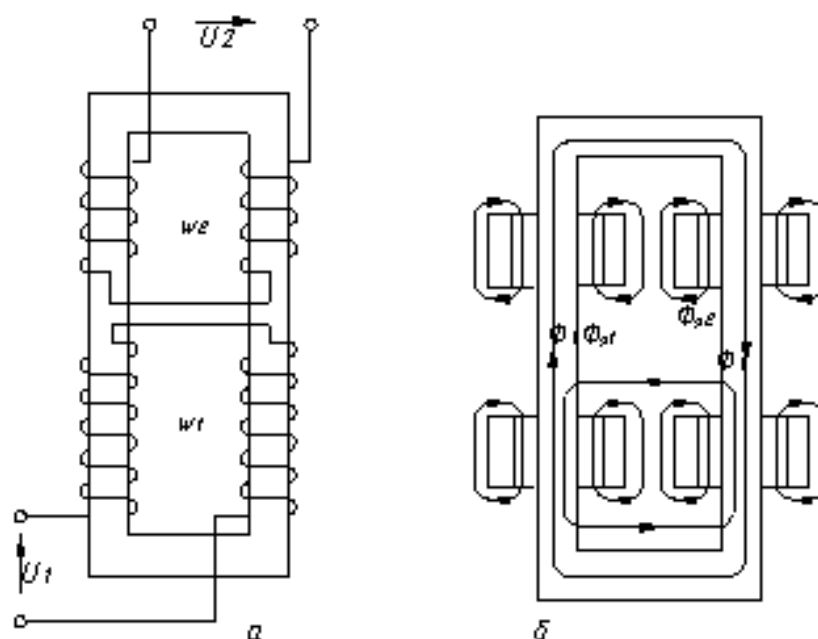
Источники питания сварочной дуги подразделяют по следующим основным признакам:

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

Необходимая для устойчивого горения дуги индуктивность сварочной цепи на переменном токе может быть получена либо в трансформаторе, либо включением в цепь дуги реактивной катушки. Индуктивность обеспечивает получение крутопадающей характеристики источника и возможность его настройки на заданный режим. В зависимости, от способа создания в цепи дуги индуктивного сопротивления трансформаторы могут быть с увеличенным магнитным рассеянием без реактивной катушки и нормальным магнитным рассеянием в сочетании с реактивной катушкой.

На рисунке 4.8, а показана электромагнитная схема трансформатора с увеличением магнитным рассеянием, а на рисунке 4.8, б – распределение магнитных потоков. В трансформаторах установлен сердечник стержневого типа. Первичная  $W1$  и вторичная  $W2$  обмотки разнесены по высоте магнитопровода. При прохождении тока по обмоткам возникают магнитные потоки, основная часть которых (создаваемая намагничивающее силой первичной и вторичной обмоток) замыкается по

стержню магнитопровода  $\Phi T$ , а другая – по воздуху, образуя потоки рассеяния  $\Phi P1$  и  $\Phi P2$ . Потоки рассеяния наводят в трансформаторе реактивную ЭДС, определяющую его индуктивное сопротивление, которое регулируют, изменяя магнитное сопротивление на пути потоков рассеяния. Это достигается при раздвижении катушек по высоте магнитопровода, размещении первичной и вторичной обмоток на разных стержнях сердечника, установке в окне магнитопровода подвижного или неподвижного магнитного шунта. В трансформаторах типов ТС, ТСК и ТД с подвижными катушками первичная и вторичная обмотки расположены вдоль стержня магнитопровода на некотором расстоянии одна от другой. Магнитное рассеяние регулируют, изменяя расстояние между обмотками.

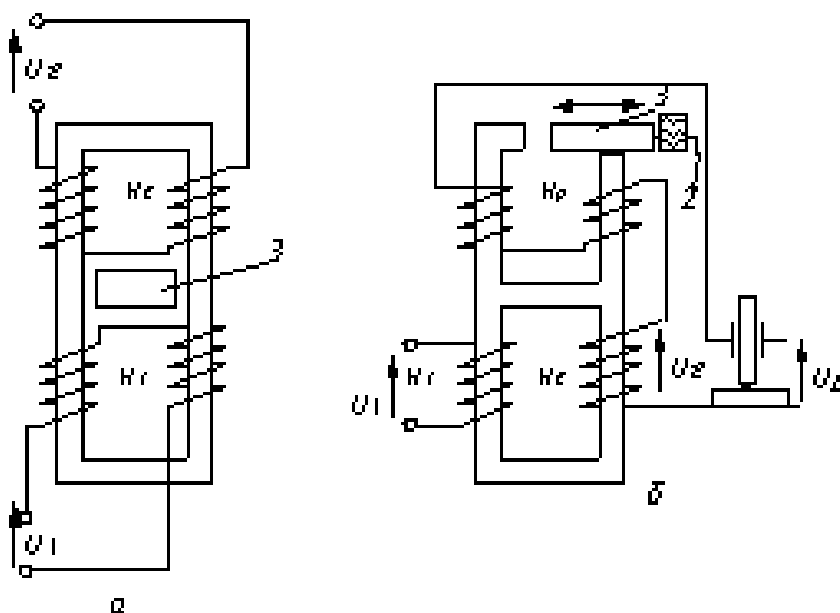


**Рис. 4.8. Электромагнитная схема сварочного трансформатора с повышенным (а) магнитным рассеянием и распределение (б) магнитных потоков**

В сварочных трансформаторах типа СТШ (рис. 4.9, а) катушки первичной  $W1$  и вторичной  $W2$  обмоток расположены на разных стержнях магнитопровода. Между обмотками в окне магнитопровода установлен

магнитный шунт, перемещением которого на пути потоков рассеяния изменяют индуктивное сопротивление, внешнюю характеристику и сварочный ток.

В трансформаторах типа ТСД с нормальным рассеянием обмотки размещают на стержневом магнитопроводе таким образом, чтобы потоки рассеяния были минимальными. Для получения необходимой индуктивности в цепь дуги последовательно со вторичной обмоткой включают дополнительную реактивную катушку  $W_p$ . В зависимости от ее конструктивного выполнения различают трансформаторы с отдельной и совмещенной катушкой. Промышленность выпускает трансформаторы только с совмещенной реактивной катушкой, которую располагают на магнитопроводе с обмотками трансформатора (рис. 4.9, б).



**Рис. 4.9.** Электромагнитные схемы сварочных трансформаторов с магнитным шунтом (а) и нормальным рассеянием (б): 1 – подвижный пакет магнитопровода; 2 – рукоятка; 3 – магнитный шунт.

Крутизна падающей нагрузочной характеристики определяется значением индуктивного сопротивления  $X_p$  катушки  $W_p$ . Значение  $X_p$  изменяют, перемещая подвижный пакет 1 магнитопровода дросселя при

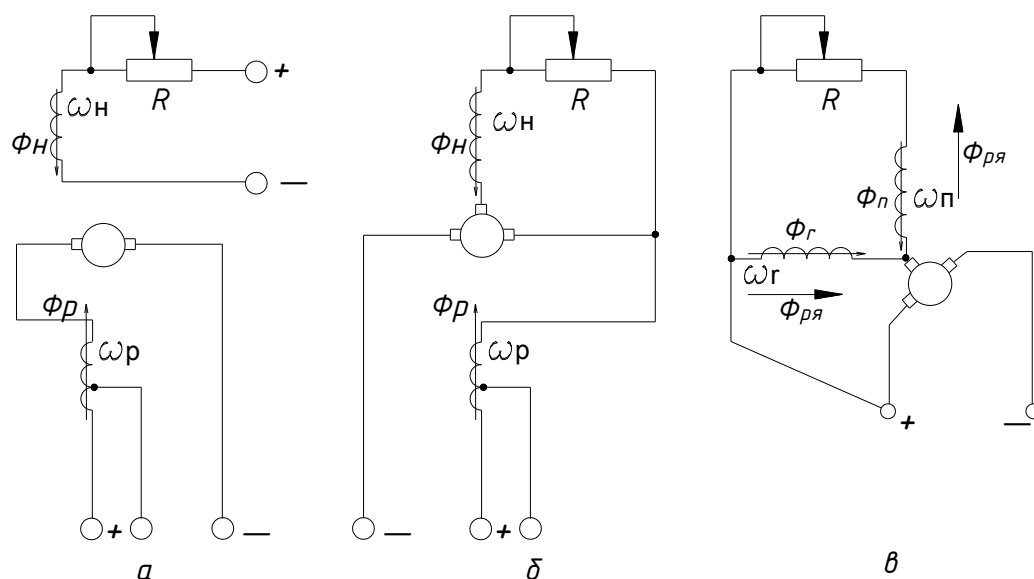
помощи рукоятки 2. С ростом воздушного зазора магнитный поток в реактивной катушке и ее индуктивное сопротивление уменьшаются, а сварочный ток увеличивается.

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

Преобразователь – установка, состоящая из асинхронного электродвигателя и генератора постоянного тока. При отсутствии электроснабжения для электросварки применяют сварочные агрегаты, включающие в себя двигатель внутреннего сгорания и генератор постоянного тока.

Все однопостовые генераторы снабжены намагничивающими обмотками  $W_n$ , получающими питание от независимого источника (рис. 4.10, а) или от самого генератора (рис. 4.10, б). В первом случае – это генераторы с независимым возбуждением, во втором – с самовозбуждением. При протекании намагничивающего тока по обмотке  $W_n$  в генераторе наводится намагничивающий магнитный поток, который регулируют, изменяя ток намагничивания при помощи резистора  $R$ . Обмотка возбуждения  $W_p$  включена последовательно с дугой. Магнитный поток  $\Phi_p$ , создаваемый намагничивающей силой обмотки  $W_p$  возбуждения, возникает только при нагрузке генератора. В зависимости от способа включения обмотки  $W_p$  поток  $\Phi_p$  направлен встречно или согласно с намагничивающим потоком  $\Phi_n$ .

При размагничивающем действии потока  $\Phi_p$  нагрузочная характеристика генератора приобретает крутопадающий характер. Последовательная размагничивающая обмотка возбуждения предусматривается в генераторах преобразователей ПСО-200, ПСО-500, ПСО-800, АСО-2000.



**Рис. 4.10. Схема генераторов сварочного тока: а – с независимым возбуждением; б – с самовозбуждением; в – с расщепленными полюсами.**

При подмагничивающем действии потока  $\Phi_r$  нагрузочная возрастающая характеристика генератора становится жесткой.

Генератор с параллельной обмоткой самовозбуждения и последовательно включенной размагничивающей обмоткой (рис. 4.10, б) при встречном их включении имеет падающую внешнюю характеристику, создаваемую за счет размагничивающего действия последовательной обмотки  $W_p$ . Сварочный ток регулируют ступенчато, переключая число витков последовательной обмотки. В пределах каждой ступени сварочный ток плавно изменяют реостатом  $R$ . По этой схеме выполнены генераторы преобразователей ПСО-300М и др.

У генераторов с расщепленными полюсами (рис. 4.10, в) падающие внешние характеристики получаются в результате размагничивающего действия потока обмотки якоря (реакции якоря). В таких генераторах одноименные полюса расположены рядом и каждую их пару считают одним, но расщепленным на два. Вертикально размещенные полюса называют поперечными, а горизонтально – главными. Последние имеют

небольшое сечение и работают всегда при полном магнитном насыщении, т.е. магнитный поток  $\Phi_{\Sigma}$ , при всех нагрузках остается неизменным. Генераторы с расщепленными полюсами, по существу, являются двухполюсными, и их магнитный поток можно разделить на потоки  $\Phi_{\Sigma}$  и  $\Phi_n$ , которые определяют ЭДС якоря.

На холостом ходу, когда отсутствует ток в якорной цепи, магнитный поток реакции якоря, направленный навстречу потоку  $\Phi_n$ , также равен нулю. Поэтому поток  $\Phi_n$  и результирующий поток, определяемый потоками  $\Phi_{\Sigma}$  и  $\Phi_n$ , имеют наибольшие значения, а генератор – наибольшее напряжение.

При работе под нагрузкой через обмотку якоря проходит ток, создающий поток реакции якоря, совпадающий с направлением магнитного потока  $\Phi_{\Sigma}$  главных полюсов и увеличивающий его. Направление потока  $\Phi_n$  противоположное, и поток реакции якоря уменьшает его. Таким образом, магнитный поток якоря с учетом режима постоянного насыщения главных полюсов не может увеличить поток  $\Phi_{\Sigma}$ , он только уменьшает поток  $\Phi_n$ , что приводит к снижению напряжения на генераторе.

При коротком замыкании в сварочной цепи магнитный поток реакции якоря наибольший, в этом случае результирующий магнитный поток, а следовательно, и напряжение генератора уменьшаются до нуля. Таким образом, размагничивающее действие потока реакции якоря создает падающий характер внешней характеристики генератора. Сварочный ток регулируют реостатом в цепи обмотки  $W_n$  возбуждения, создающей поток  $\Phi_n$ .

Преобразователи ПС-300М, ПС-300, СУГ-2Р и другие оборудованы генераторами с расщепленными полюсами.

Универсальные сварочные преобразователи предназначены для питания постов ручной и автоматической дуговой сварки в защитной



среде. Требуемый характер внешней характеристики получают при различном включении обмоток возбуждения. К сварочным преобразователям с универсальными характеристиками относятся ПСУ-300 и ПСУ-500.

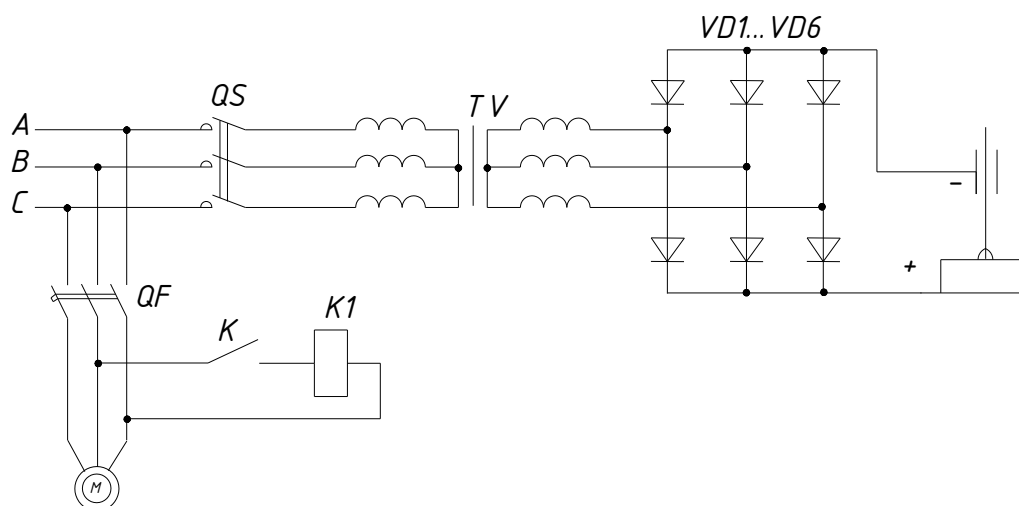
Преимущества сварочных выпрямителей перед генераторами заключаются в более высоком КПД и более высоких динамических показателях. Они не имеют вращающихся частей, просты в изготовлении и надежны в эксплуатации. Выпрямители состоят из трансформатора и блока неуправляемых (селеновых, кремниевых) или управляемых (тиристоров) вентилей. Сварочные выпрямители бывают с круто- и пологопадающими или жесткими и универсальными характеристиками. Наиболее распространены одно- и трехфазные мостовые схемы выпрямления.

Выпрямители с крутопадающими внешними характеристиками применяют для ручной дуговой сварки. К этой группе относятся выпрямители типов ВСС, ВКС и ВД.

Например, выпрямители типа ВСС представляют собой сварочную установку, состоящую из понижающего трансформатора  $T$  (рис. 4.11), блока селеновых выпрямителей  $VD1...VD6$ , электродвигателя  $M$  вентилятора для принудительного охлаждения и аппаратуры управления, смонтированной в общем кожухе. Трехфазный понижающий трансформатор выполнен с увеличенным магнитным рассеянием, что обеспечивает создание семейства падающих характеристик. Сварочный ток регулируют переключением первичной и вторичной обмоток с треугольника на звезду, а также изменением расстояния между первичной и вторичной обмотками.

Для получения крутопадающей внешней характеристики и регулирования тока в некоторых конструкциях сварочных выпрямителей используют дроссель насыщения, включенный между трансформатором с

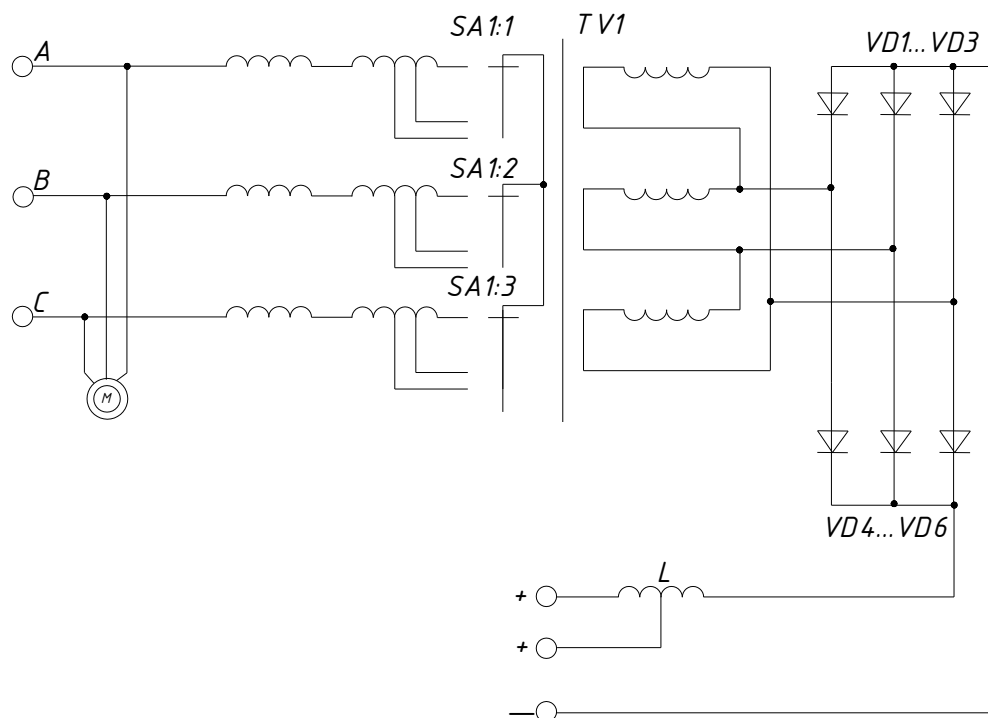
нормальным рассеянием и выпрямительным блоком. Сварочный ток регулируют, изменяя намагничивание дросселя.



**Рис. 4.11. Электрическая схема сварочного выпрямителя**

Сварочные выпрямители ВС, ВДГ, ВДЖ и другие, с плогопадающей или жесткой внешней характеристикой предназначены для сварки в защитной среде. Выпрямитель типа ВС (рис. 4.12); состоит из трехфазного трансформатора  $T$  с нормальным магнитным рассеянием и секционированной первичной обмоткой, выпрямительного блока  $VD1...VD6$ , собранного на кремниевых вентилях по трехфазной мостовой схеме, переключателей для регулирования напряжения на дуге, стабилизирующего дросселя  $L$  в цепи выпрямительного тока, электродвигателя  $M$  вентилятора.

Напряжение, подаваемое на дугу, регулируют при помощи переключателя, изменяющего число витков первичных обмоток трансформатора. Дроссель  $L$  ограничивает скорость нарастания тока с целью уменьшения разбрызгивания расплавленного металла. Для расширения диапазона режимов сварки дроссель секционируют.

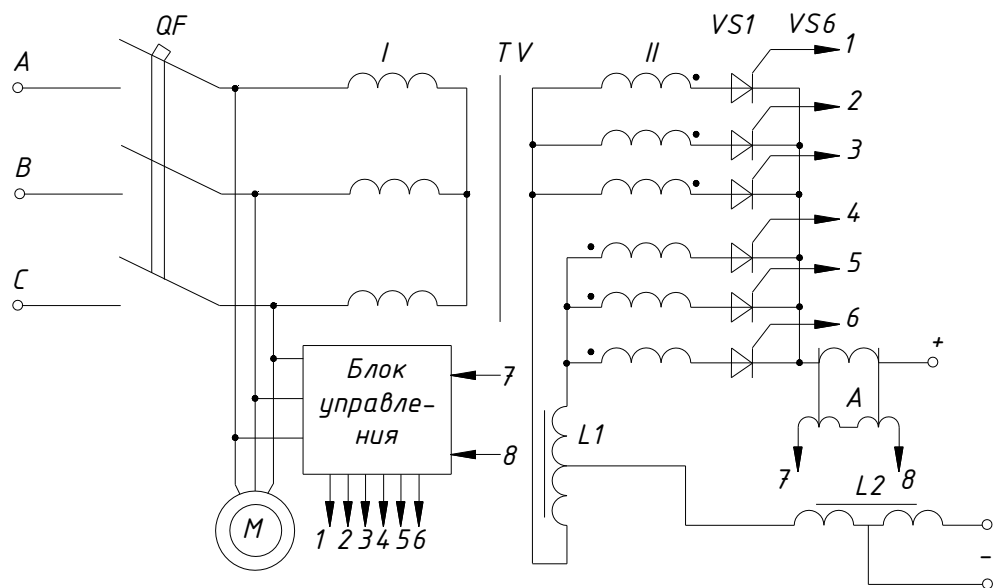


**Рис. 4.12. Электрическая схема выпрямителя ВС**

Универсальные сварочные выпрямители работают как на жестких, так и на падающих внешних характеристиках. Они обеспечивают изменение сварочного тока и напряжения на дуге, стабилизацию режима сварки при отклонениях напряжения сети.

Например, сварочный выпрямитель типа ВДУ (рис. 4.13) состоит из трехфазного трансформатора  $T$ , вентильного блока из шести тиристоров  $VS1...VS6$ , собранных по шестифазной схеме с уравнительным дросселем  $L1$ , магнитного усилителя  $A$ , блока управления  $БУ$  тиристорами, охлаждающего вентилятора с электрическим двигателем  $M$ , стабилизирующего дросселя  $L2$ .

Для получения жестких характеристик индуктивность стабилизирующего дросселя уменьшают, а для получения крутопадающих – увеличивают. Сварочный ток регулируют плавно при помощи блока управления, изменяя угол открытия тиристоров.



**Рис. 4.13. Электрическая схема выпрямителя ВДУ**

## РАЗДЕЛ 5. ИНДУКЦИОННЫЙ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ НАГРЕВ

### 5.1. Особенности индукционного нагрева и его основные физические закономерности

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:

$$e = -\frac{\partial \Phi}{\partial \tau} \quad (5.1)$$

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.

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

$$\dot{S} = \left| \dot{E} \cdot \dot{H}^* \right| \quad (5.2)$$

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

Вектор  $\dot{S}$  (Вт/м<sup>2</sup> или Дж/с·м<sup>2</sup>), плотности потока мощности при синусоидальном изменении вектором  $\dot{E}$  и  $\dot{H}^*$  является средним значением потока энергии в секунду (мощности) через единицу площади, перпендикулярной направлению распространения волны.

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

$$E = E_0 \cdot e^{-\frac{z}{z_0}}, \quad (5.3)$$

$$H = H_0 \cdot e^{-\frac{z}{z_0}}, \quad (5.4)$$

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

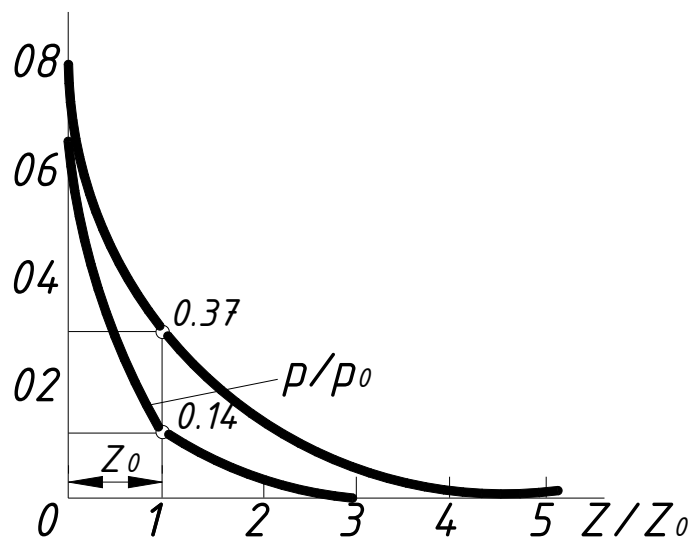


Рис. 5.1. График распространения электромагнитного поля и проводящей средой

Эквивалентная глубина проникновения  $z_0$  электромагнитной волны определяется выражением (3.8). На расстоянии  $z_0$  от поверхности амплитуды  $E$  и  $H$  уменьшаются до следующих значений:

$$E = E_0 \cdot e^{-1} = 0,37 \cdot E_0 . \quad (5.5)$$

$$H = H_0 \cdot e^{-1} = 0,37 \cdot H_0 . \quad (5.6)$$

то есть амплитуда волны уменьшается в  $e = 2.718$  раза, или затухает до 37% своего начального значения (рис. 5.1).

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

$$S = S_0 \cdot e^{-\frac{2 \cdot z}{z_0}} , \quad (5.7)$$

где  $S_0$  - плотность потока мощности на поверхности проводника.

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

Плотность потока мощности на глубине  $z_0$  уменьшается до значения:

$$S = S_0 \cdot e^{-2} = 0,14 \cdot S_0 . \quad (5.8)$$

то есть в слое толщиной  $z_0$  поглощается и выделяется в виде теплоты 86% всей энергии, прошедшей через поверхностный слой проводника (см. рисунок 5.1).

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

$$\text{Re } S = P = 2 \cdot 10^{-3} \cdot (I \cdot w)^2 \cdot \sqrt{\rho \cdot \mu_r \cdot f} , \quad (5.9)$$

где  $I$  - сила тока в индукторе, А;  $w$  - число витков, приходящееся на 1 м длины индуктора;  $\rho$  и  $\mu_r$  - удельное электрическое сопротивление, Ом·м, и относительная магнитная проницаемость металла;  $f$  - частота тока, Гц;  $\sqrt{\rho \cdot \mu_r \cdot f}$  - коэффициент поглощения мощности.

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

$$\operatorname{Im} S = Q = 2 \cdot 10^{-3} \cdot (I \cdot w)^2 \cdot \sqrt{\rho \cdot \mu_r \cdot f} . \quad (5.10)$$

В практике индукционного нагрева имеет место падение электромагнитной волны на металлические тела различной формы. Поэтому в формуле (5.9) и (5.10) вводятся поправочные коэффициенты, учитывающие геометрические размеры нагреваемой детали и глубину проникновения электромагнитной энергии. Потоки мощности через боковую поверхность металлического цилиндра диаметром  $D_M$ , высотой 1 м и периметром  $\Pi = \pi \cdot D_M$  для активной мощности:

$$P_{\text{м}} = 2 \cdot 10^{-3} \cdot (I \cdot w)^2 \cdot \Pi \cdot \sqrt{\rho \cdot \mu_r \cdot f} \cdot K_p , \quad (7.10)$$

для реактивной мощности

$$Q = 2 \cdot 10^{-3} \cdot (I \cdot w)^2 \cdot \Pi \cdot \sqrt{\rho \cdot \mu_r \cdot f} \cdot K_Q , \quad (7.11)$$

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

Графики для определения поправочных коэффициентов  $K_p$  и  $K_Q$  при расчете потоков активной и реактивной мощностей, проходящих через наружную поверхность металлического цилиндра, приведены на рисунке 5.2.

При нагреве немагнитных (цветных) металлов, для которых  $\mu=1$ , изменяется их удельное сопротивление, а при нагреве ферромагнитных металлов (сталей) изменяется и относительная магнитная проницаемость. В последующем случае удельное сопротивление возрастает при повышении температуры до точки магнитных превращений (730...760 °С) – точки Кюри, а затем его рост замедляется. На рисунке 5.3. показана



зависимость удельного сопротивления стали от температуры. При нагреве до 800°C удельное сопротивление стали возрастает в несколько раз. Ее магнитная проницаемость при нагреве до 650...750°C уменьшается незначительно, а при переходе через точку Кюри резко падает до единицы.

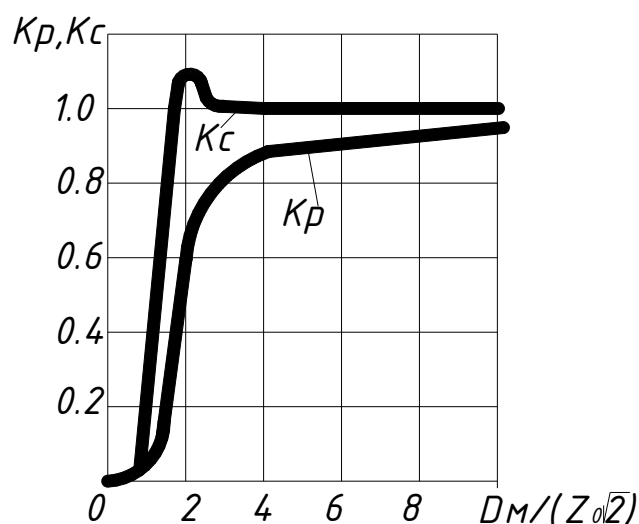


Рис. 5.2. К определению поправочных коэффициентов  $K_p$  и  $K_Q$ :  $D$  – диаметр нагреваемой детали;  $z_0$  – глубина проникновения электрического тока

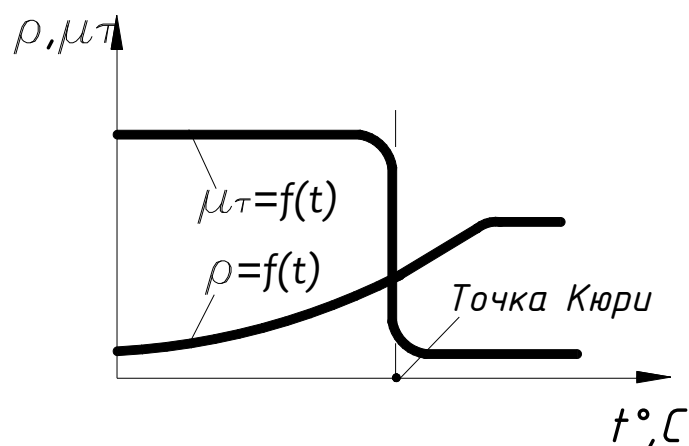


Рис. 5.3. Зависимость  $\rho$  и  $\mu$ , стали от температуры

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 слое толщиной  $x=z_0$  выделяется 87% тепловой энергии, на расстоянии  $x=z_0$  от поверхности мощность снижается в 7,4 раза, а плотность тока – в 2,7 раза. На интенсивность и характер нагрева значительно влияют частота тока  $f$ , напряжённость электрического поля  $E$  и напряжённость магнитного поля  $H$ . Изменяя частоту тока, можно получить необходимый по технологии характер нагрева и его интенсивность.

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

## **5.2 Индукторы. Конструктивное исполнение и область применения**

Установки индукционного нагрева широко применяют на различных ремонтных предприятиях. Токи средней и высокой частоты используют

для сквозного нагрева деталей перед горячей деформацией, при восстановлении их методами наплавки, металлизации и пайки, а также для поверхностной закалки деталей и других технологических операций. Основным элементом такого рода устройства является индуктор.

Индукторы в зависимости от назначения и формы нагреваемого изделия бывают: 1) цилиндрические; 2) овальные; 3) щелевые; 4) стержневые; 5) плоские; 6) петлевые.

Изделия прямоугольной формы нагревают в овальных, плоских и петлевых индукторах. Для цилиндрических деталей используют индукторы практически всех типов.

**Рис.5.4. Цилиндрический индуктор: 1- стальная труба; 2- индуктирующий провод**

Цилиндрические индукторы (рис. 5.1) наиболее просты по конструкции и надёжны в эксплуатации, а их общий КПД достаточно высок. Конструктивно индуктор состоит из:

- многовиткового индуктирующего провода из медной трубки или медной шинки;
- токопроводящих шин;
- контактных колодок;
- устройство для подачи воды, охлаждающий индуктор.

В индукторах для сквозного нагрева изделий используется тепловая изоляция.

В настоящее время применяют для низкотемпературного нагрева индуктор типа «многовитковый индуктор в ферромагнитной трубе». Они используются для обогрева полов, панелей и стен в животноводческих помещениях, для обогрева почвы и воздуха в парниках и теплицах.

Такой нагреватель представляет собой ферромагнитную трубу, внутри которой расположена индуктирующая одно- или многожильная обмотка, выполняемая из стержней, установочного провода или

контрольного кабеля. Ферромагнитная труба является одновременно приёмником энергии магнитного поля и генератором теплоты, служит несущей конструкцией и защищает обмотку индуктора от механических повреждений. Переменный магнитный поток  $\Phi$ , создаваемый индуктирующей обмоткой нагревателя, наводит в ферромагнитной трубе вихревые токи, которые нагревают её. В трубе выделяется 80...85% всей тепловой энергии, в индукторе – 15...20%. Благодаря последовательному соединению жил обмотки индуктора нагреватель может подключён на сетевое напряжение. В зависимости от материала и диаметра труб, воздушного зазора между обмоткой индуктора и трубой коэффициент мощности нагревателя составляет  $\cos\varphi = 0,88...0,92$ .

Нагреватели с индуктором, охватывающие снаружи нагреваемое изделие, применяют для обогрева трубопроводов, нагрева воды и т.д. Нагреватель состоит из ферромагнитной трубы (или корпуса), на наружную поверхность которой наматывается индуктирующая одно- или многослойная обмотка, выполненная из провода с теплостойкой изоляцией. Нагреватели изготавливают в однофазном и трехфазном исполнении. В зависимости от технологических требований нагреватель можно подключать на пониженное или сетевое напряжение.

Используют также нагреватели трансформаторного типа, которые применяют при теплоснабжении и горячем водоснабжении животноводческих, производственных и бытовых помещений.

### **5.3. Коэффициент полезного действия и коэффициент мощности при индукционном нагреве**

Электромагнитная энергия, подводимая к индуктору, расходуется на полезный нагрев детали, компенсацию тепловых потерь с ее поверхности, а также на нагрев провода индуктора током, протекающим по нему.

Отношение энергии  $Q_1$  затраченной на нагрев детали, ко всей энергии, подведенной к индуктору, называется его полным КПД:

$$\eta_u = \eta_m \cdot \eta_\varepsilon = \frac{Q_1}{Q_1 + Q_2 + Q_3}, \quad (5.12)$$

где  $\eta_u$ ,  $\eta_m$ ,  $\eta_\varepsilon$  - полный, термический и электрический КПД индуктора;  $Q_1$  - полезно расходуемая на нагрев детали теплота, Дж;  $Q_2$  - тепловые потери, Дж;  $Q_3$  - теплота, выделяющаяся в проводе индуктора, Дж.

Термический КПД, характеризующий тепловые потери с поверхности детали, равен:

$$\eta_m = \frac{Q_1}{Q_1 + Q_2}. \quad (5.13)$$

Термический КПД растет с увеличением толщины тепловой изоляции нагреваемой детали. Тепловые потери возрастают с увеличением температуры поверхности детали и времени нагрева.

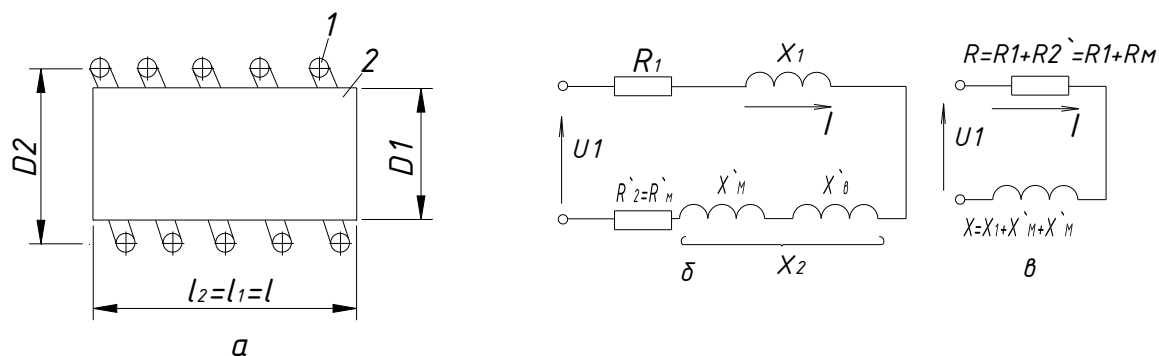
Электрический КПД, характеризующий совершенство передачи энергии из индуктора на деталь, представляет собой отношение электромагнитной энергии, поступающей в деталь, ко всей энергии, подводимой к индуктору:

$$\eta_\varepsilon = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_1 + Q_2 + Q_3}. \quad (5.14)$$

Если энергию  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$  отнести к единице времени, то можно записать:

$$\eta_\varepsilon = \frac{P_2}{P}, \quad (5.15)$$

где  $P_2$  - мощность, передаваемая в деталь, Вт;  $P$  - мощность, подведенная к индуктору, Вт.



**Рис. 5.5.** Индукционное нагревательное устройство (а) и схемы его замещения (б и в): 1 – индуктор; 2 – нагреваемый металлический цилиндр;  $I$  – сила тока;  $U_1$ ,  $R_1$  и  $X_1$  – напряжение, активное и индуктивное сопротивление индуктора;  $R'_2=R'_2$  и  $X'_{12}$  – активное и индуктивное сопротивление металла, приведенные к индуктору;  $R$  и  $X$  – общее активное и индуктивное сопротивления индукционного нагревателя.

Система индуктор – деталь представляет собой воздушный трансформатор, у которого первичной обмоткой является индуктор, а вторичной обмоткой и одновременно нагрузкой – нагреваемый металл. Индукционный нагреватель и схема его замещения показаны на рисунке 5.5. Напряжение на индукторе, В:

$$U_1 = I_1 \cdot \sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_{12})^2}, \quad (5.16)$$

где  $I_1$  – ток в индукторе, А;  $R_1$  и  $X_1$  – активное и индуктивное сопротивление первичной цепи (индуктора), Ом;  $R'_2$  и  $X'_{12}$  – активное и индуктивное сопротивление вторичной цепи, Ом, приведенные к току индуктора.

Сопротивление  $R'_2$  и  $X'_{12}$ :

$$R'_2 = R_2 \cdot W_2^2, \quad (5.17)$$

$$X'_{12} = X_2 \cdot W_2^2, \quad (5.18)$$

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

Мощность, передаваемая в деталь:

$$P_2 = I_1^2 \cdot R'_2. \quad (5.19)$$

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

$$R_2 = \frac{\rho_2 \cdot \pi \cdot D_2}{l \cdot z_{02}} , \quad (5.20)$$

где  $\rho_2$  - удельное электрическое сопротивление нагреваемого металла, Ом·м;  $D_2$  - диаметр цилиндра, м;  $l$  - длина цилиндра, м;  $z_{02}$  - эквивалентная глубина проникновения электромагнитного поля в нагреваемом металле, м.

Активное сопротивление, Ом; нагреваемого металла, принесенное к току индуктора в соответствии с формулой (5.17).

$$R'_2 = R_2 \cdot W = \frac{\rho_2 \cdot \pi \cdot D_2 \cdot W^2}{l \cdot z_{01}} . \quad (5.21)$$

Мощность, Вт, подаваемая на индуктор,

$$P = I_1^2 \cdot (R_1 + R'_2) . \quad (5.22)$$

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

$$R_1 = \frac{\rho_1 \cdot \pi \cdot D_1 \cdot W^2}{l \cdot z_{01}} , \quad (5.23)$$

где  $\rho_1$  - удельное электрическое сопротивление проводника индуктора, Ом·м;  $D_1$  - диаметр индуктора, м;  $l$  - длина индуктора, м;  $z_{01}$  - эквивалентная глубина проникновения электрического тока в проводнике индуктора, м.

Электрический КПД системы индуктор – деталь по выражению (5.15) с учетом отношений (5.19) и (5.22)

$$\eta_s = \frac{P_2}{P_1} = R'_2 \cdot (R_1 + R'_2) . \quad (5.24)$$

Принимая во внимание уравнения (5.21) и (5.23).

$$\eta_s = \frac{1}{1 + \left(\frac{D_1}{D_2}\right) \cdot \sqrt{\frac{\rho_1 \cdot \mu_1}{\rho_2 \cdot \mu_2}}} . \quad (5.25)$$

В большинстве случаев индуктор выполняют из медного проводникового материала, для которого  $\mu_1 = 1$ , г

$$\eta_s = \frac{1}{1 + \left(\frac{D_1}{D_2}\right) \cdot \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2 \cdot \mu_2}}} . \quad (5.26)$$

Таким образом, КПД системы индуктор от соотношения диаметров индуктора и детали, а также удельного электрического сопротивления их материалов. Чем меньше отношение  $\rho_1/\rho_2\mu$ , тем выше КПД. Чтобы получить его значение, индукторы изготавливают из электролитической меди, имеющей низкое удельное сопротивление. Индукционный нагрев ферромагнитных материалов ( $\mu_2 > 1$ ) с большим удельным сопротивлением более экономичен, чем нагрев цветных металлов. Например, при нагреве медного цилиндра в медном индукторе при идеальных условиях ( $D_1/D_2=1$ )

$$\eta_s = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}}} . \quad (5.27)$$

В реальных условиях при  $D_1/D_2$  КПД будет меньше 0,5 в начале нагрева и лишь по мере разогрева металла, когда  $\rho_2$  значительно возрастает, КПД достигнет максимального значения.

При расчете коэффициента мощности индукционной установки учитывают активные и реактивные сопротивления в нагреваемом металле, индукторе и воздушном зазоре.

Для схемы замещения системы индуктор – деталь (рис. 5.5, б) общее активное сопротивление:

$$R = R_1 + R'_2 = R_1 + R'_m . \quad (5.28)$$

общее индуктивное сопротивление:

$$X = X_1 + X'_m + X'_e . \quad (5.29)$$

полное сопротивление:

$$Z = \sqrt{(R_1 + R'_m)^2 + (X_1 + X'_m + X'_e)^2} , \quad (5.30)$$



где  $R_m$  и  $X_m'$  - активное и индуктивное сопротивления нагреваемого металла приведенные к току индуктора Ом;  $X_\epsilon'$  - индуктивное сопротивление воздушного зазора, приведенное к току индуктора, Ом.

Коэффициент мощности индукционного нагревателя

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{R_1 + R'_m}{\sqrt{(R_1 + R'_m)^2 + (X_1 + X'_m + X'_\epsilon)^2}} . \quad (5.31)$$

Внутри нагреваемого металла фазы электрического и магнитного полей отличаются на угол  $45^\circ$ , т.е.  $X_m = R_m$ , а

$$\cos \varphi_m = \frac{R_m}{\sqrt{R_m^2 + X_m^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707 . \quad (5.32)$$

Результирующий коэффициент мощности системы индуктор – металл ввиду большого потока рассеяния в воздухе всегда меньше внутренней коэффициент мощности в металле.

Для повышения коэффициента мощности параллельно индуктору подключают конденсаторную батарею. При этом образуется колебательный контур (индуктор – конденсаторная батарея), настраиваемый в резонанс. При резонансе колебательный контур потребляет из источника питания только активную мощность. При этом источник и линия, соединяющая его с индуктором, разгружаются от реактивной энергии.

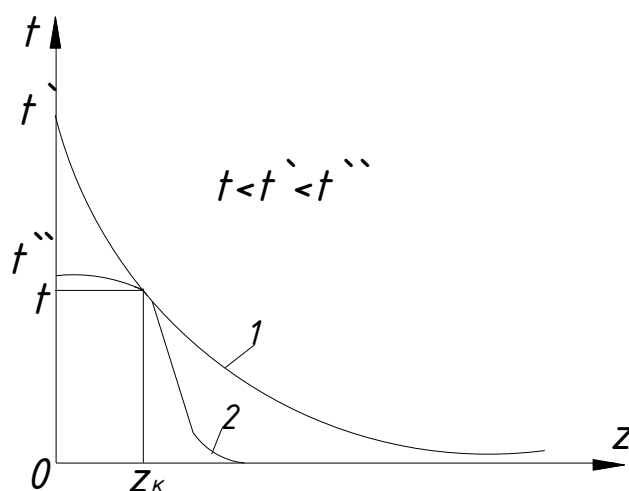
#### 5.4. Режимы индукционного нагрева

Установки индукционного нагрева работают в двух режимах – глубинном и поверхностном, различающихся характером распределения температуры в нагреваемых деталях.

На рисунке 5.6 показано распределение температуры при нагреве детали на глубину  $z_k$ . Индекс «к» говорит о том, что на этой глубине температура металла превышает точку магнитных превращений.

Эквивалентную глубину  $z_{0к}$  проникновения тока в этом случае называют горячей.

Кривая 1 соответствует режиму  $z_k < z_{0к}$ , называемому глубинным, так как теплота выделяется во всем слое глубиной  $z_{0к}$ . Кривая 2 соответствует поверхностному режиму  $z_k > z_{0к}$ . Здесь теплота выделяется лишь в поверхностном слое глубиной  $z_{0к}$ , а внутренние слои называются так главным образом за счет теплопроводности.



**Рис. 5.6. Распределение температуры по сечению нагреваемого материала при индукционном нагреве: 1 и 2 – глубинный и поверхностный нагрев.**

Из анализа графиков распределения температуры видно, что при поверхностном нагреве большое количество теплоты тратится на нагрев внутренних слоев, находящихся за слоем  $z_k$ . Температура за этим слоем падает более полого, чем при глубинном нагреве, следовательно, и КПД ниже. Происходит это из-за увеличения времени нагрева, которое становится примерно таким же, как и при нагреве с внешними источниками теплоты – при плазменном нагреве, нагреве в печах сопротивления и др. Очевидно, что для повышения КПД установки следует стремиться к глубинному нагреву по всей толщине нагреваемого слоя.

Чтобы обеспечить глубинный режим на требуемой толщине нагреваемого материала, необходимо правильно выбирать частоту питающего тока.

При индукционном сквозном нагреве с постоянной удельной мощностью нижний предел частоты определяется необходимостью обеспечения достаточно высокого термического КПД, а верхний – требуемой скоростью нагрева. При нагреве изделий цилиндрической формы частота тока  $f$  должна быть в следующих пределах:

$$\frac{3 \cdot 10^8 \cdot \rho_2}{d_2^2 \cdot \mu_2} < f < \frac{6 \cdot 10^8 \cdot \rho_2}{d_2^2 \cdot \mu_2}, \quad (5.33)$$

где  $\rho_2$  - удельное сопротивление нагреваемого металла, Ом·см;  $\mu_2$  - относительная магнитная проницаемость металла;  $d_2$  - диаметр нагреваемой детали, см.

При поверхностном нагреве под закалку частоту выбирают таким образом, чтобы глубина  $z_{0к}$  проникновения тока в сталь при температуре выше точки Кюри была несколько больше требуемой глубины  $z_k$  заковки. Наиболее целесообразно выбирать частоту в таком диапазоне:

$$\frac{150}{z_k} < f < \frac{2500}{z_k}. \quad (5.34)$$

В сельском хозяйстве применяют прямой и косвенный индукционный нагрев.

Прямой нагрев реализуют установки, используемые в ремонтно-механических мастерских для сквозного и поверхностного нагрева металлических деталей.

Сквозному нагреву подвергают металл перед последующей горячей деформацией (ковкой, штамповкой, прокаткой, прессовкой), а также для сварки. Поверхностный нагрев применяют для заковки трущихся поверхностей стальных деталей, чтобы уменьшить их износ. При этом в поверхностном слое повышается твердость металла, а внутренние слои не изменяют свою структуру, обеспечивая мягкость и вязкость сердцевины

детали. Для закалки поверхностные слои детали необходимо нагреть до температуры выше точки магнитных превращений, а затем быстро охладить.

Конструкция индуктора для сквозного нагрева металлических деталей определяется их размерами и формой. Наиболее распространены индукторы, предназначенные для нагрева цилиндрических деталей и выполненные из индуктирующего провода в виде соленоида. Чтобы снизить электрические потери, при изготовлении индуктора используют хороший проводниковый материал, например электролитическую медь. При конструировании индукторов учитывают, что сила тока в индукторе достигает тысяч ампер, а электрические потери в нем составляют 25...30% полезной мощности установки. Чтобы предотвратить перегрев индуктора, его выполняют из медной, охлаждаемой водой трубки круглого и прямоугольного сечения. Многовитковые индукторы для сквозного нагрева присоединяют при помощи шин непосредственно к источнику питания.

Для питания индукторов, используемых для поверхностного нагрева с целью закалки деталей или инструмента и состоящих из одного- двух витков, требуется низкое напряжение. Поэтому их присоединяют через понижающий трансформатор.

В сельскохозяйственном производстве применяют также косвенный индукционный нагрев на частоте 50 Гц. При этой частоте сокращается расход энергии и снижаются капитальные затраты, поскольку не требуется преобразователь частоты. Косвенный индукционный нагрев используют для технологического обогрева: металлических трубопроводов и емкостей, полов животноводческих и птицеводческих помещений, почвы в парниках и теплицах.

## **5.5. Расчёт индукционных нагревателей на промышленной частоте**

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  $d_{mp} = 0,015; 0,02; 0,025$  м.

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

$$\Phi_l = k_2 \cdot \Delta T - k_1, \quad (5.35)$$

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:

$$U_l = k_3 + 0,006 \cdot \Delta T, \quad (5.36)$$

где  $k_1; k_2; k_3$  – коэффициенты, зависящие от диаметра трубы  $d$  (см. таблицу 5.1).

Таблица 5.1. 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  $U_l$  и  $\Phi_l$  определяют конструктивные параметры нагревателя.

Определяют длину провода, м, индуктора на фазу:

$$l_{np} = \frac{U_\phi}{U_l}. \quad (5.37)$$

Определяют длину нагревателя, м, подключаемого на фазное напряжение питающей сети:

$$l_{\phi} = \frac{P_{\phi}}{\Phi_l} . \quad (5.38)$$

Определяют число проводов, прокладываемых в трубе:

$$n_{np} = \frac{l_{np}}{l_{\phi}} . \quad (5.39)$$

Определяют ток индуктора, А:

$$I = 1,09 \frac{P_{\phi}}{U_{\phi}} . \quad (5.40)$$

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

## 5.6. Основы диэлектрического нагрева и его особенности

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

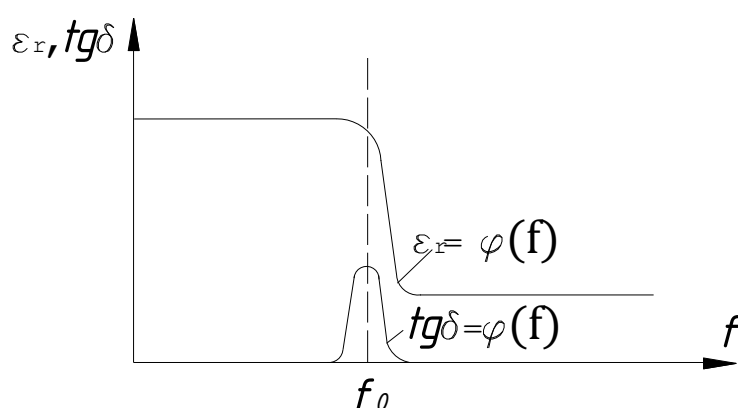
В диэлектриках процессы поляризации сопровождаются движением (смещением) связанных зарядов, которые есть не что иное, как ток электрического смещения. Плотность тока смещения определяется скоростью изменения вектора электрической индукции  $\bar{D}$ .

$$\bar{J} = \frac{\partial \bar{D}}{\partial \tau} . \quad (5.41)$$

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  $\varepsilon_0 = 1/4\pi \cdot (9 \cdot 10^9)$  Ф/м:

$$P_v = 5,55 \cdot 10^{-11} \cdot f \cdot E_2 \cdot \varepsilon_r \cdot \operatorname{tg} \delta . \quad (5.42)$$

Из уравнения (5.42) следует, что диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon_r$  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  $\varepsilon_r$  и  $\operatorname{tg} \delta$  от частоты показан на рисунке 5.7.



**Рис. 5.7. Зависимость  $\varepsilon_r$  и  $\operatorname{tg} \delta$  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  $\operatorname{tg} \delta$  на некоторой частоте  $f_0$  достигает максимального значения. При дальнейшем повышении частоты заряды не успевают смещаться, отслеживая изменения электрического поля. Поэтому  $\varepsilon_r$  уменьшается, поглощение энергии при малых смещениях снижается и, следовательно, уменьшается и  $\operatorname{tg} \delta$ . В зависимости от структуры диэлектриков и характера поляризации кривая  $\operatorname{tg} \delta$  может иметь несколько максимумов, а кривая  $\varepsilon_r$  – 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:

$$z_0 = \frac{\lambda}{\pi \cdot \sqrt{2 \cdot \varepsilon_r \cdot (\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} - 1)}} , \quad (5.43)$$

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

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

$$z_0 = \frac{\lambda}{\pi \cdot \sqrt{\varepsilon_r} \cdot \operatorname{tg} \delta} . \quad (5.44)$$

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

### **5.7. Выбор частоты и напряженности электрического поля при диэлектрическом нагреве**

В соответствии с выражением (5.42) объемная плотность мощности определяется параметрами электрического поля (напряженностью  $E$  частотой  $f$  и электрофизическими показателями нагреваемого материала ( $\varepsilon_r, \operatorname{tg} \delta$ )).

При выборе напряженности электрического поля исходят из того, что для каждого нагреваемого материала существует определенная напряженность  $E_{np}$ , при превышении которой происходит электрический



пробой материала. Пробивная напряженность многих материалов составляет несколько киловольт на миллиметр.

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

$$E = \frac{E_{np}}{1,5...2} . \quad (5.45)$$

Воздушный зазор между нагреваемым материалом и обкладками рабочего конденсатора приводит к тому, что напряжение, поданное на конденсатор, перераспределяется между воздушным зазором и материалом. При этом рабочую напряженность электрического поля в материале выбирают в зависимости от пробивной напряженности воздуха. Допустимая напряженность электрического поля в воздушном зазоре составляет  $(6...9) \cdot 10^3$  В/см, а напряженность в материале:

$$E = \frac{E_z}{\varepsilon_r} , \quad (5.46)$$

где  $E_z$  - напряженность электрического поля в воздушном зазоре, В/см;  $\varepsilon_r$  – диэлектрическая проницаемость материала.

При выборе частоты электрического поля исходят из следующих соображений. С учетом заданных параметров нагреваемого материала уравнение энергетического баланса диэлектрического нагрева описывается как:

$$2\pi \cdot f \cdot E^2 \cdot \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta = \frac{\rho \cdot c \cdot (t_2 - t_1)}{\eta_m \cdot \tau} , \quad (5.47)$$

где  $\eta_m$  - термический коэффициент полезного действия;  $\tau$  – время нагрева, с.

Минимальную частоту, обеспечивающую требуемый режим нагрева без воздушного зазора в рабочем конденсаторе, находят из выражения (5.47):

$$f_{\min} = \frac{\rho \cdot c \cdot (t_2 - t_1)}{2\pi \cdot \eta_m \cdot \tau \cdot E^2 \cdot \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta} . \quad (5.48)$$

При нагреве материала с воздушным зазором в рабочем конденсаторе

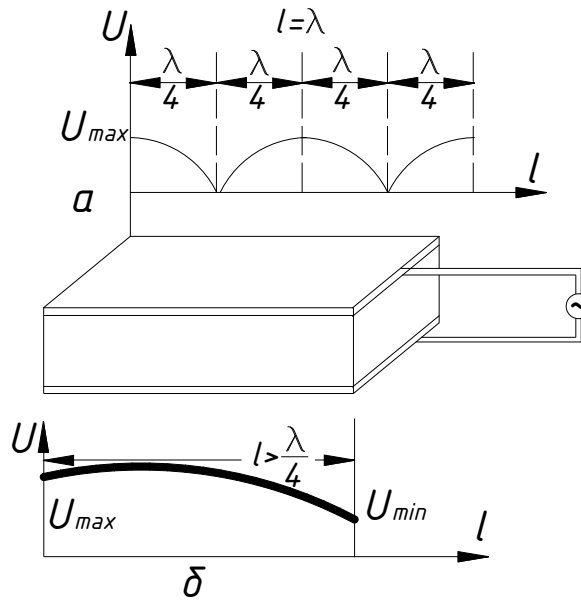
$$f_{\min} = \frac{\rho \cdot c \cdot (t_2 - t_1) \cdot \varepsilon_r}{2\pi \cdot \eta_m \cdot \tau \cdot E^2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \operatorname{tg} \delta} . \quad (5.49)$$

Увеличивая частоту поля, можно выделить в материале требуемую объемную плотность мощности при пониженной напряженности поля. Это повышает надежность работы нагреваемой установки, уменьшает вероятность возникновения пробоя в рабочем конденсаторе и, следовательно, порчи нагреваемого материала. Однако, повышение частоты ограничивается равномерным распределением напряженности поля по всей длине электродов рабочего конденсатора. Сложностью согласования параметров источника питания и нагрузки, а также глубиной проникновения электромагнитной энергии в материал. Первое ограничение на верхний предел частоты вызвано соотношением конструктивных параметров диэлектрического нагревательного устройства с длиной  $\lambda$  волны, соответствующей частоты  $f$ , между которыми существует известная связь:

$$\lambda = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r \cdot f}} , \quad (5.50)$$

где  $c=3 \cdot 10^8$  м/с - скорость света в свободном пространстве.

С увеличением линейного размера нагреваемого материала возникают стоячие волны, изменяющие распределение напряжения по длине электродов рабочего конденсатора и, следовательно, напряженности поля, в материале. При условии, что больший размер электрода  $2a$  находится в кратных соотношениях с длиной  $\lambda$  стоячей волны, напряжение в некоторых точках достигает максимума  $U_{\max}$ , а в других  $U_{\min}=0$  (рис. 5.8,а). При  $2a < \lambda/4$  напряжение по длине  $l$  электрода изменяется от  $U_{\min}$  до  $U_{\max}$  (рис. 5.8.б), что соответствует более равномерному распределению напряженности.



**Рис. 5.8.** Распределение напряжения на пластинах рабочего конденсатора при  $l=\lambda$  (а) и при  $l<\lambda/4$

Напряженность, В/м, электрического поля в любой точке по длине электрода:

$$E_l = E_{\max} \cdot \cos \frac{2\pi \cdot l}{\lambda}, \quad (5.51)$$

где  $E_{\max}$  - максимальная напряженность электрического поля в точке, соответствующей  $U_{\max}$ , В/м.

Для точки, находящейся на расстоянии  $l = a$ :

$$\frac{E_a}{E_{\max}} = \cos \frac{2\pi \cdot a}{\lambda}, \quad (5.52)$$

где  $E_a$  - напряженность электрического поля для точки на расстоянии  $l = a$ , В/м.

Отношение  $Ea/E_{\max}$  характеризует неравномерность распределения электрического поля в рабочем конденсаторе. Если она задана требованиями технологического процесса, то из формулы (5.52) определяют значение  $k=2a/\lambda$ , а по отношению (5.50) – максимальную частоту, удовлетворяющую этим требованиям:

$$f_{\max} = \frac{k \cdot c}{2 \cdot a \cdot \sqrt{\epsilon_r}}, \quad (5.53)$$

где  $2a$  - наибольший относительно точек подключения питания линейный размер электрода рабочего конденсатора.

Чтобы снизить неравномерность напряженности поля в материале, рабочий конденсатор присоединяют к источнику питания посередине электродов. При этом размер  $2a$  равен половине длины электродов.

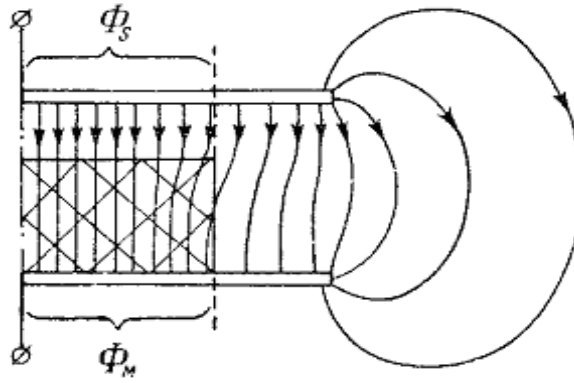
Верхнее значение частоты определяется также глубиной проникновения электромагнитной волны в материал и возможностью согласования параметров нагрузки и генератора для максимальной передачи энергии в рабочий конденсатор.

### **5.8. Расчёт конденсатора для диэлектрического нагрева**

При разработке емкостного нагревателя для непроводниковых материалов часто возникает необходимость расчета эквивалентных электрических параметров рабочего конденсатора. Точный расчет емкости конденсатора, частично заполненного диэлектриком, весьма затруднен, но может быть выполнен приближенно по схеме замещения, если электрическое поле конденсатора удовлетворяет условиям квазистационарности. Из принципиальной картины квазистационарного электрического поля (рис. 5.9) следует, что поток вектора электрического смещения в зазоре конденсатора  $\Phi_s$  и поток в материале  $\Phi_m$  приближенно равны:

$$\Phi_s \approx \Phi_m. \quad (5.54)$$

Это равенство тем точнее, чем меньше зазор и диэлектрическая проницаемость нагреваемого материала. Приближенный характер равенства (5.54) мало сказывается на точности расчета эквивалентных параметров конденсатора, так как емкость и проводимость – интегральные характеристики системы. Неоднородность поля у краев диэлектрика влияет только на распределение внутренних источников тепла.



**Рис. 5.9.** Принципиальная картина электрического поля рабочего конденсатора с нагрузкой

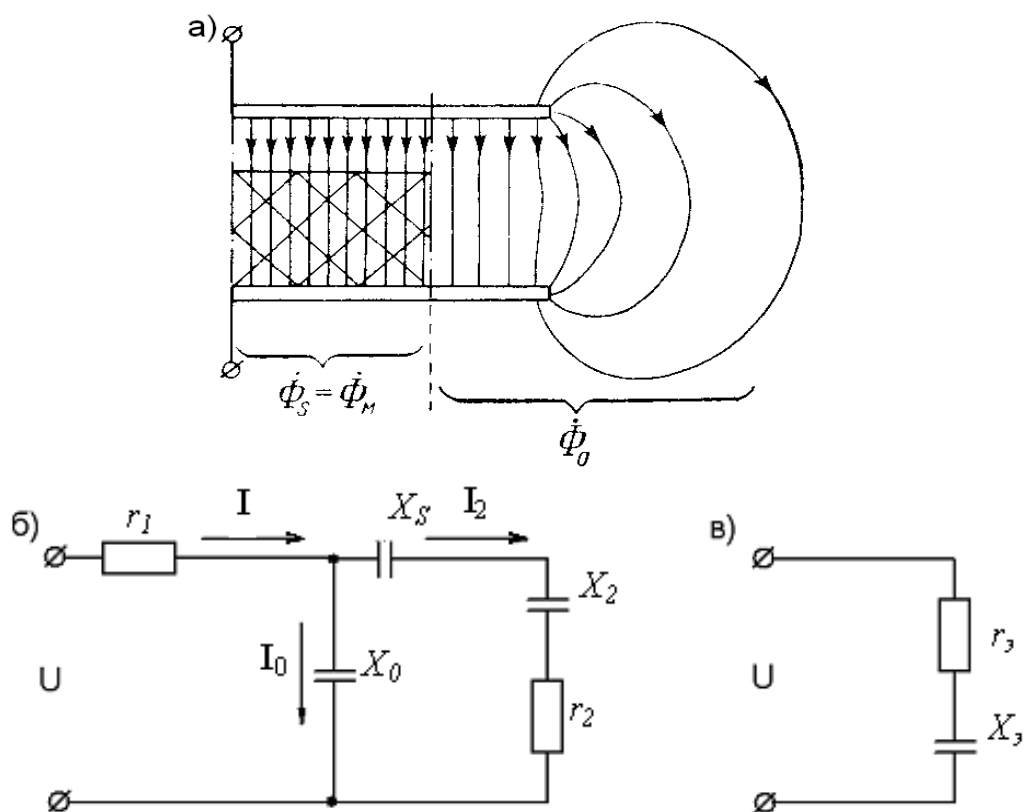
Если считать равенство (5.54) точным, то можно отделить рабочий поток конденсатора, т. е. поток вектора электрического смещения, проходящий через нагрузку и воздушный зазор, от внешнего потока  $\Phi_0$ , проходящего у краев конденсатора. На рис. 5.10,а показана идеализированная картина электрического поля, а на рис. 5.10,б - соответствующая ей схема замещения.

Активное сопротивление растеканию высокочастотного тока по электродам конденсатора  $r_1$  зависит от их формы и места расположения контактов. Так как емкостный нагреватель является всегда высоковольтной и относительно слаботочной системой, то влиянием на эквивалентные параметры конденсатора можно пренебречь.

Сопротивление воздушного зазора  $x_s = \frac{1}{\omega \cdot C_s}$  и нагреваемого материала

$z_2 = r_2 - jx_2 = \frac{1}{j\omega \cdot C_2}$ , где  $\omega$  - круговая частота тока;  $r_2$  и  $x_2$  - активное и

емкостное сопротивления нагреваемого материала.



**Рис. 5.10. Приведение параметров рабочего конденсатора: а - идеализированная картина электрического поля; б - электрическая схема замещения; в - приведенная к входным контактам конденсатора электрическая схема**

Понятиями емкость зазора  $C_s$  и комплексная емкость материала  $C_2$  можно пользоваться, если параллельная электродам поверхность материала эквипотенциальна. Для принятой идеализации картины электрического поля это условие всегда соблюдается.

Внешнее емкостное сопротивление  $x_0$  обусловлено потоком  $\Phi_0$ . Для расчета  $x_0 = \frac{1}{\omega C_0}$ , где  $C_0$  - внешняя или, точнее, краевая емкость рабочего конденсатора,

можно использовать некоторые общие свойства электрического поля конденсатора и магнитного поля индуктора. Если рассмотреть схему замещения индуктора с нагреваемой деталью, основанную на общности магнитного потока обратного замыкания, то легко заметить полную аналогию между этой схемой и схемой рис. 5.10,б. Схема замещения индуктора по общему потоку получается из схемы рис.

5.10,б путем замены всех емкостей индуктивностями, а сопротивление  $r_l$  становится сопротивлением провода индуктора.

Самым интересным является аналогия между внешним сопротивлением  $x_0$  и индуктивным сопротивлением обратного замыкания, которое тоже обозначено  $x_0$  в схеме замещения индуктора. Это сопротивление при расчете индуктора находится на основании предположения, что внешнее магнитное поле индуктора с деталью подобно полю пустого индуктора. Справедливость такого предположения доказана экспериментально. Очевидно, справедливо и аналогичное утверждение: внешнее (краевое) поле конденсатора с нагрузкой подобно полю пустого конденсатора. Отсюда сразу следует способ расчета:

$$C_0 = C - C_{cp.ч} , \quad (5.55)$$

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

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

$$C_{cp.ч} = \frac{\varepsilon_0 S_2}{d_1} , \quad (5.56)$$

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

Если применяется цилиндрический конденсатор, то вместо формулы (5.56) следует использовать соответствующее выражение для электрического поля, обладающего осевой симметрией. Следует отметить, что этот способ расчета краевой емкости рекомендуется для уточнения результатов измерения параметров диэлектрика на куметре.

Если схему замещения (рис. 5.10, б) преобразовать в одноконтурную (рис. 5.10, в), то эквивалентные сопротивления:

$$r_3 = r_1 + Lr_2 \approx Lr_2; \quad (5.57)$$

$$x_3 = L \left[ (x_2 + x_s) + \frac{r_2^2 + (x_2 + x_s)^2}{x_0} \right], \quad (5.58)$$

где  $L$  - коэффициент приведения параметров:

$$L = \frac{1}{\left(\frac{r_2}{x_0}\right)^2 + \left(1 + \frac{x_2 + x_s}{x_0}\right)^2}. \quad (5.59)$$

Из-за полной аналогии схем замещения внешний вид формул (5.57...5.59) и формул расчета параметров индуктора по общему потоку совпадает. Погрешность методики расчета индуктора по общему потоку не превышает 10...15%. Так как расчет конденсатора по формулам (5.55...5.59) основан на подобных допущениях, то ожидаемая погрешность должна быть такого же порядка.

## **5.9. Источники питания установок индукционного и диэлектрического нагрева**

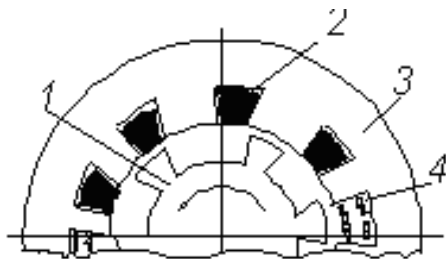
При индукционном нагреве принято различать источники питания и установки низкой (промышленной) 50 Гц, средней (повышенной)  $(0,15...10) \cdot 10^3$  Гц и высокой  $(0,15...100) \cdot 10^5$  Гц частот. При диэлектрическом нагреве используют источники и установки высокой  $(3...100) \cdot 10^6$  Гц и сверхвысокой  $(0,3...220) \cdot 10^8$  Гц частот.

В индукционных установках низкой частоты в качестве источника питания применяют сеть переменного тока частотой 50 Гц. Работа таких установок отличается повышенной надежностью из-за отсутствия дополнительных преобразователей электрической энергии и имеет ряд отличительных особенностей, некоторые из которых рассмотрены в разделе 5.1.



Машинные и тиристорные (статические) преобразователи – источники питания установок индукционного нагрева частоты до 10 кГц.

Машинный преобразователь частот состоит из генератора повышенной частоты и трехфазного приводного электродвигателя.



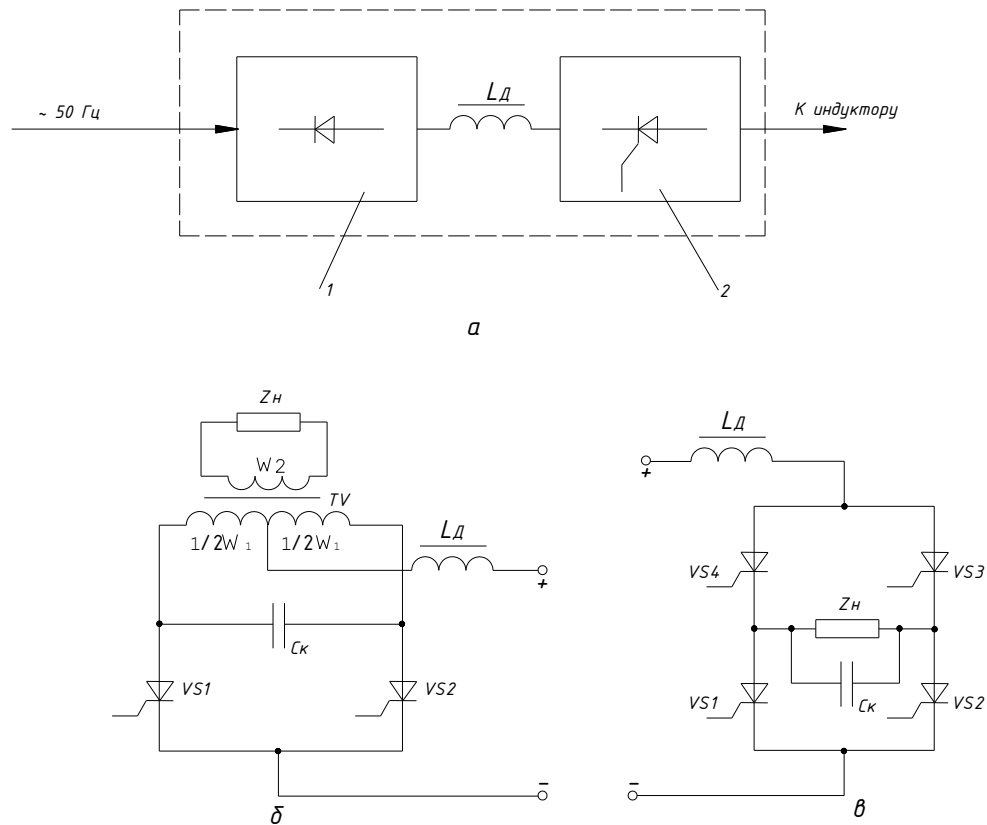
**Рис. 5.11. Схема индуктивного генератора: 1 – ротор; 2 – статорная обмотка; 3 – статор; 4 – обмотка возбуждения**

Генератор относится к типу индукторных машин. Для их возбуждения, как и синхронных, используется постоянный ток (рис. 5.11). В отличие от синхронных машин, в которых при вращении ротора обмотки возбуждения и рабочие обмотки переменного тока перемещаются одна относительно другой, в индукторных машинах взаимосвязь между обмотками происходит за счет вращения ферромагнитной массы ротора. У последнего нет никаких обмоток. Форма ротора зубчатая, аналогичная конфигурации ротора явнополюсных синхронных машин. Рабочая обмотка 2 и обмотка 4 возбуждения расположены на статоре 3. При вращении ротора его зубцы и впадины поочередно устанавливаются против паза статора, в котором расположена обмотка возбуждения. Вследствие этого магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения, приобретает пульсирующий характер и, пересекая витки рабочей обмотки, индуцирует в них ЭДС с частотой:

$$f = \frac{z_2 \cdot n}{60}, \quad (5.60)$$

где  $f$  - частота тока генератора, Гц;  $z_2$  - число зубцов ротора;  $n$  - частота вращения ротора, мин<sup>-1</sup>.

Недостатки машинных генераторов заключаются в наличии вращающихся частей, значительных габаритных размерах, шуме при работе, сравнительно невысоком КПД.



**Рис. 5.12. Блок-схема тиристорных преобразователей (а) частоты, принципиальная схема мостового (б) и нулевого (в) инверторов: 1 – выпрямитель; 2 – инвертор**

В статических преобразователях повышенную частоту получают за счет коммутации постоянного тока управляемыми вентилями (тиристорами).

Тиристорный преобразователь частоты состоит из двух основных узлов: выпрямителя 1 (рис. 5.12,а), преобразующего переменный ток промышленной частоты в постоянный, и автономного инвертора 2, преобразующего постоянный ток в переменный высокой частоты.

Сглаживающий фильтр, соединяющий эти узлы, часто является элементом схемы инвертора.

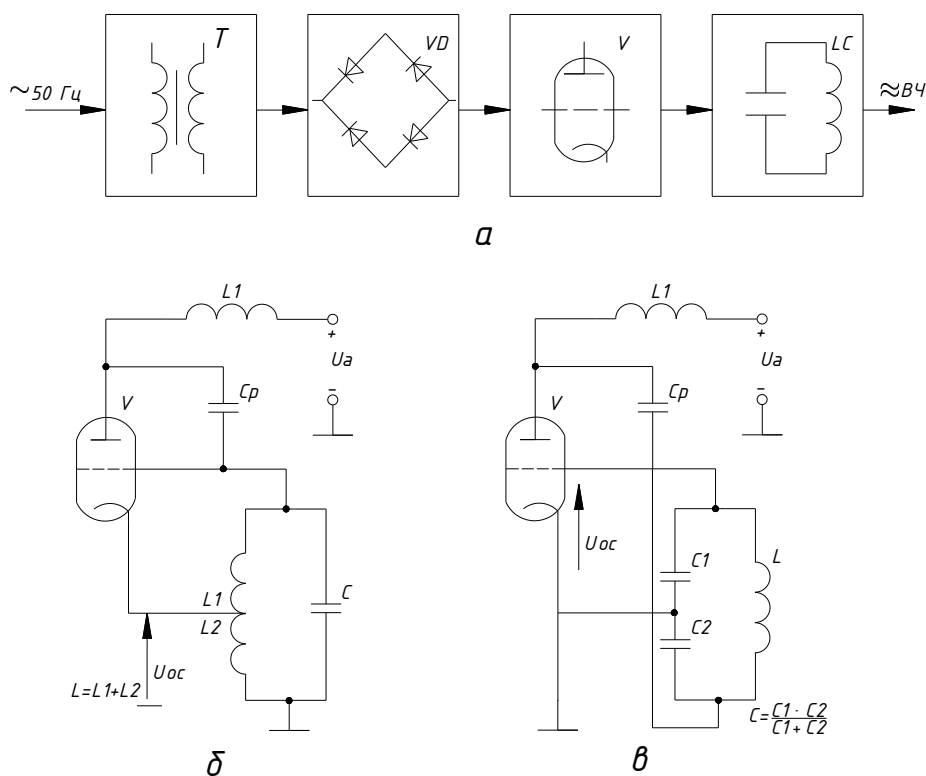
По аналогии с выпрямителями автономные инверторы выполняются по нулевой и мостовой схеме.

Нулевая схема (рис. 5.12,б) инвертора включает тиристоры  $VS1$  и  $VS2$ , коммутирующий конденсатор  $C_k$ , трансформатор  $TV$ . Его первичная обмотка имеет вывод от половины числа витков, а ко вторичной подключают нагрузку  $Z_H$  – индуктор. На управляющие электроды тиристоров  $VS1$  и  $VS2$  от схемы управления поступают импульсы с относительным сдвигом фаз в  $180^\circ$ . Тиристоры, поочередно открываясь, обеспечивают перезарядку коммутирующего конденсатора через первичную обмотку  $W_1$  трансформатора  $TV$ . При этом во вторичной обмотке  $W_2$  и нагрузке возникает переменный ток определенной частоты.

В мостовой схеме (рис. 5.12, в) нагрузка  $Z_H$  включена в диагональ моста, образованного тиристорами  $VS1...VS4$ . При открытии тиристоров  $VS1$ ,  $VS3$  ток в нагрузке протекает в одном направлении, а при открытии тиристоров  $VS2$ ,  $VS4$  – в противоположном направлении. Для коммутации тиристоров использован конденсатор  $C_k$ .

Благодаря тиристорным преобразователям можно плавно изменять рабочую частоту, что необходимо для поддержания оптимального режима при работе на нагрузку с изменяющимися параметрами. У тиристорных преобразователей более высокий КПД и более высокая надежность по сравнению с машинными преобразователями частоты.

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



**Рис. 5.13. Блок схема (а) и принципиальные схемы лампового генератора с автотрансформаторной (б) и емкостной (в) обратной связью**

Основные элементы ламповых генераторов (рис. 5.13, а): силовой трансформатор  $T$ , повышающий напряжение до 6...10 кВ; выпрямительный блок  $VD$  на мощных вентилях для преобразования переменного тока в постоянный напряжением 9...15 кВ; генераторный блок  $V$  с одной или несколькими генераторными лампами, преобразующий энергию постоянного тока в энергию энергетических колебаний высокой частоты; колебательный контур  $LC$ . В схемах ламповых генераторов с автотрансформаторной (рис. 5.13,б) и емкостной (рис. 5.13, в) обратной связью электронная лампа  $V$ , управляемая при помощи напряжения обратной связи  $U_{oc}$  выполняет функцию ключа, подсоединяющего контур  $LC$  в определенные моменты времени к источнику питания  $U_a$  для компенсации потерь в контуре и превращения затухающих колебаний в незатухающие.

Рабочая частота, Гц, генератора:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}, \quad (5.61)$$

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

Для получения от лампового генератора максимальной мощности и высокого КПД необходимо иметь вполне определенное сопротивление нагрузки, т.е. контура. Согласование параметров контура и лампы заключается в том, что напряжение на рабочем элементе копира (нагрузке), потребляющем активную энергию (индуктор или рабочий конденсатор), приводится к напряжению на генераторе (имеется в виду переменное анодное напряжение).

В общем случае для согласования напряжений можно изменить параметры контура, сохранив одну и ту же резонансную частоту, использовать согласующие трансформаторы, автотрансформаторное включение контура, многоконтурные колебательные системы.

Основная задача автоматического управления высокочастотными установками - поддержание или регулирование по определенному закону мощности или температуры в технологическом процессе нагрева, что позволяет получить высокое качество продукции и оптимальные энергетические и технико-экономические показатели. Режим работы высокочастотного лампового генератора регулируют, изменяя напряжение источника питания (выпрямитель, трансформатор) или параметры анодного и рабочего копиров лампового генератора.

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

Магнетрон состоит из анодного блока и рабочего магнита. В центре анодного блока расположен катод 4 (рис. 5.14, а), окруженный анодом 1, представляющим собой массивный медный цилиндр, внутреннюю поверхность которого образует четное число симметрично размещенных объемных резонаторов 2, связанных с межэлектродным пространством щелевым зазором. Объемный резонатор по принципу действия представляет собой колебательную систему с сосредоточенными параметрами. Все резонаторы связаны один с другим, так как магнитный поток одного из них замыкается через соседние.

При подаче анодного напряжения в кольцевом вакуумном зазоре между катодом и анодом, который заземляется, образуется радиальное электрическое поле. Рабочий магнит создает магнитное поле, заставляющее электроны, вылетающие из катода, отклоняться от радиального направления и двигаться по спиральной траектории. Таким образом, в пространстве между катодом и анодом непрерывно существует электронное облако, вращающееся вокруг катода с определенной угловой скоростью. Когда электроны движутся вблизи щелевых зазоров резонаторов, в них появляются импульсы тока и возникают собственные колебания. Энергия незатухающих колебаний выводится через один из резонаторов при помощи индуктивной петли связи и по коаксиальной или волной линии подается к внешней нагрузке.

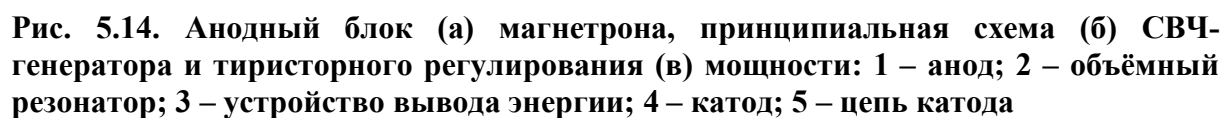
В общем виде генерируемая магнетроном частота  $f$  определяется числом резонаторов  $T$  и напряженностью магнитного поля  $H$ :

$$f = a \cdot N \cdot H . \quad (5.62)$$

Напряженность магнитного поля:

$$H = b^{\sqrt{U_a}} , \quad (5.63)$$

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



Источники питания магнетронных СВЧ-генераторов могут быть одно- и трехфазные. На рисунке 5.14.б показана принципиальная электрическая схема источника питания магнетрона, включающая в себя высоковольтный трансформатор  $T1$ , высоковольтный выпрямитель  $VD1...VD4$ , трансформатор  $T2$  питания накала магнетрона и электромагнит  $Y$ .

Чтобы упростить и удешевить электротермические СВЧ-установки, для питания магнетронов используют переменный ток. При этом исключается потребность в выпрямителях. Магнетроны включают во вторичную обмотку высоковольтного трансформатора по схеме двухподупериодного выпрямления (рис. 5.14, в). В этом случае каждый из них работает один полупериод.

Регулирование мощности источника СВЧ-энергии увеличивает его функциональные возможности, а в некоторых технологических процессах оно просто необходимо. Регулирование может быть дискретным (ступенчатым) и плавным. Ступенчатое регулирование осуществляется переключением выводов высоковольтного трансформатора, а плавное – при помощи полноводных регуляторов мощности, а также тиристорных регуляторов напряжения. При этом используют два тиристора  $VS1$  и  $VS2$ , включенные между собой встречно-параллельно и последовательно с первичной обмоткой трансформатора анодного напряжения. В зависимости от угла отпирания тиристоров изменяется анодное напряжение магнетронов  $V1$  и  $V2$  и, следовательно, генерируемая мощность СВЧ. Сигнал управления тиристорами вырабатывается специальным блоком.

СВЧ-установки применяют для нагрева и сушки различных сельскохозяйственных материалов, стимуляции биологических процессов, уничтожения сорняков и вредителей растений, стерилизации продукции сельскохозяйственного производства, лечения животных и птицы.



Высокочастотные и сверхвысокочастотные установки для диэлектрического нагрева применяют для различных видов тепловой обработки неэлектропроводящих материалов (сушка древесины, керамики, фруктов и др., сварка термопластических материалов, нагрев термореактивных материалов, склеивание фанеры, пластмасс и др., нагрев пищевых продуктов и т.д.).

В установках диэлектрического нагрева обрабатываемый материал помещается между охладителями так называемого рабочего конденсатора, к которому от лампового генератора подводится высокочастотная энергия, при  $f = 500 \dots 200000$  кГц.

Нагрев диэлектриков осуществляется за счет диэлектрических потерь. Серийно выпускаются установки высокочастотного нагрева мощностью до 60 кВт, специальные установки могут достигать мощности 1 МВт.

Таблица 5.2 Технические данные установок для диэлектрического нагрева различных материалов

Материал	Частота, МГц	Напряжённость электрического поля, кВ/см	Удельная мощность, Вт/см <sup>3</sup>	Длительность обработки
Древесина (сушка)	0,3...0,75	0,1...1,0	0,003...0,05	8...30 ч
Древесина (склейка)	5...30	1,5...2,5	менее 12	15...80 сек
Литейные стержни (сушка)	6...50	—	1...3	2...20 мин
Бумага листовая (сушка)	20...30	0,1...1,0	100...300	5...60 сек
Пластикат (роликовая сварка)	40...200	10...50	1000...1500	0,03...0,2 сек

По режиму работы различают установки для диэлектрического нагрева периодического и непрерывного действия, в последнем случае чаще всего используется конвейер.

## 5.10. Современные источники питания индукционных установок

В настоящее время для индукционного нагрева широко используются два типа генераторов: тиристорные инверторы (ТИ) и высокочастотные ламповые генераторы (ЛГ). Тиристорные инверторы, применяемые в диапазоне частот до 10 кГц, обладают удовлетворительным для технологических целей К.П.Д.. Однако, относительно большое время переключения тиристоров, ограничивают применение тиристорных инверторов на повышенных частотах. Ламповые генераторы, в отличие от тиристорных инверторов, не имеют ограничения в частотах, но их главным недостатком является ограниченный срок службы, который составляет обычно до 6000 рабочих часов, в зависимости от условий эксплуатации. С другой стороны лампа как элемент электрической схемы обладает низким КПД (не выше 75%), что снижает общую эффективность генератора. На практике эффективность классических ламповых генераторов равна 50%.

С появлением силовых транзисторов, выполненных по МОП - технологии (MOSFET и IGBT) появилась возможность создания на их базе мощных высокоэффективных генераторов, обладающих значительными преимуществами по сравнению с теми, которые построены на электронных лампах и тиристорах. Этот новый тип генераторов с расширенным частотным диапазоном от 10 кГц до 200 кГц позволяет заменить электронные ламповые генераторы. Наиболее важными преимуществами таких генераторов по сравнению с ламповыми являются более высокий к.п.д., и срок службы, уменьшенные масса и габариты.

Генератор для индукционного нагрева на IGBT, производимого на базе оборудования *General Electric*, предназначен для работы на частотах до 25 кГц, с контролем и управлением температуры до 500 градусов, и с принудительным воздушным охлаждением.

Разработанный специалистами компании *General Electric* генератор для индукционного нагрева позволяет экономить на потреблении электроэнергии не меньше 20% за счет высокого КПД 96% и самое важное, не только восстановить технологию производства закалочной продукции, например, проволоки, но и поднять производительность более чем на 15% с помощью повышения частоты тока до 15 кГц. (Ограничение частоты генератора индукторного нагрева продиктовано низким КПД закалочных трансформаторов на высоких частотах, которые в основном необходимы как гальванически-развязывающие устройства).

Упрощенная электрическая схема устройства приведена на рис. 5.15. Генератор выполнен на базе инвертора тока. Инвертор содержит входной реактор, мост на мощных *IGBT* транзисторах. Для исключения отрицательного напряжения на транзисторах параллельно с каждым из них включен частотный силовой диод. Питание инвертора осуществляется от трехфазной сети через неуправляемый выпрямитель. Регулирование мощности производится ключом на *IGBT*. Генератор содержит схему автоматической настройки частоты, позволяющей работать в широком диапазоне изменения нагрузки с малыми потерями мощности. Охлаждение принудительное воздушное.

Выбор схемотехнического решения был продиктован следующими соображениями. Использование диодного выпрямителя и быстродействующего ключа вместо управляемого тиристорного выпрямителя дает возможность иметь высокий коэффициент мощности (до 0,96) во всем диапазоне регулирования, повышенные динамические показатели, уменьшенные масса и габариты входного реактора и инвертора. Отсутствует специальное устройство для запуска инвертора тока. Транзисторный ключ обеспечивает надежный пуск инвертора и быструю защиту в аварийных ситуациях. Отсутствует циркуляция реактивной мощности внутри инвертора, соответственно, низкие потери

мощности в транзисторах инвертора. Малые потери при передаче энергии по гибкому кабелю до резонансного контура.

Особенностью схемы управления частотой, представленной на рис. 5.15, является переключение транзисторов инвертора в момент достижения напряжения на компенсирующем конденсаторе нулевого значения. Такое оптимальное управление позволяет предельно снизить установленную мощность транзисторов инвертора и динамические потери мощности в них.

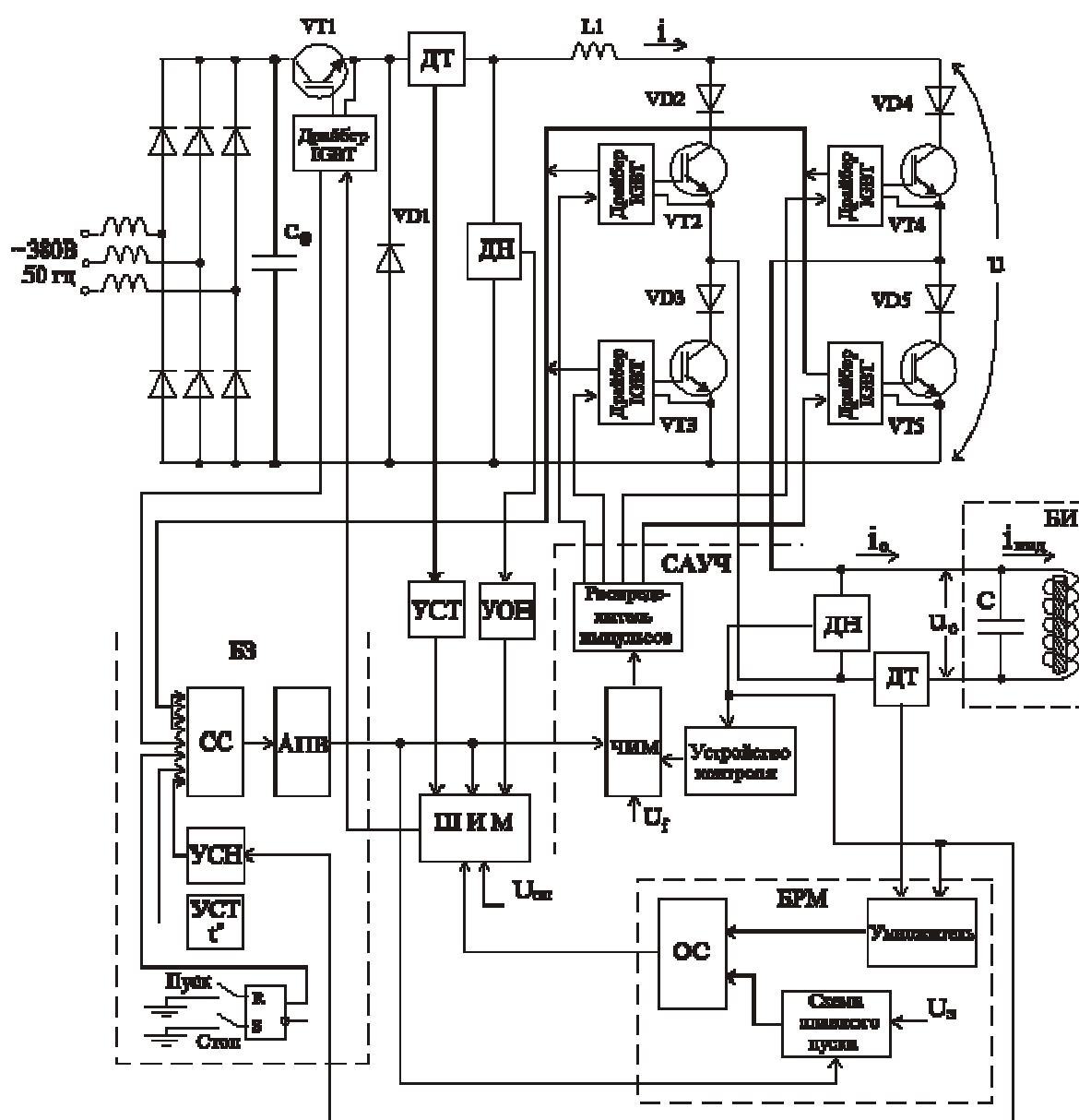


Рис. 5.15. Упрощённая электрическая схема генератора индукционного нагрева

Цифровая система управления, реализована на базе сигнального процессора фирмы *Analog Device* и микроконтроллера *Infineon C167*.

Цифровой модуль управления совместно с платой датчиков и платой дискретных входов-выходов выполняет дополнительные функции, тем самым, улучшая потребительские свойства преобразователя тока высокой частоты.

Таблица 5.3. Номенклатура генераторов для индукционного нагрева на IGBT на базе оборудования General Electric

Наименование параметра	Типы генераторов				
	ПТВЧ-160/400-4-1	ПТВЧ-315/400-4-1	ПТВЧ-800/700-4-1	ПТВЧ-1500/700-4-1	ПТВЧ-132/400-15-1
Номинальная мощность на выходе, кВт	160	315	800	1500	132
Номинальная частота на выходе, кГц	4	4	4	4	15
Допускаемый диапазон изменения выходного напряжения, В	200 - 800	200 - 800	200 - 1000	400 - 2000	200 – 800
Номинальное напряжение на входе, В	380	380	700	700	380
Допустимый ток на выходе в А с перегрузом 150% в течении 60 сек	250	550	1000	1000	324
Базовая мощность на выходе, кВт при частотах на выходе, кГц:					
– 0,4 - 0,5 и 0,8 - 1,0	160	315	800	1500	-
– 1,96 - 2,4	160	315	800	1500	-
– 3,2 - 4,0	160	315	800	1500	-
– 6,4 - 8,0	-	-	-	-	132
– 8,0 - 10,0	-	-	-	-	132
– 10,0 - 15,0	-	-	-	-	132
К.п.д. при номинальном напряжении и базовой мощности, не менее, %	96	96	96	96	96
Габаритные размеры, мм:					
– ширина	1000	1000	1200	1600	1000
– глубина	800	800	1000	1000	800
– высота	2200	2200	2200	2200	2200
Масса, кг, не более	150	150	400	600	150

Наличие мощного микропроцессора фирмы *Analog Devices* позволяет анализировать состояние силовой схемы преобразователя в зависимости от электрических процессов, происходящих в нагрузке и в реальном масштабе времени выбрать оптимальный режим работы, а также заранее предупредить возможность создания аварийной ситуации. Удобная система ввода информации через клавиатуру улучшают сервис при наладке и обслуживании. Сигнализационные лампочки и цифровая индикация передней панели создают качественное отображение информации позволяющее анализировать состояние ПТВЧ внешним наблюдением. Цифровой модуль управления позволяет поддерживать стандартные протоколы передачи данных через интерфейсы: RS-232, RS-485 и RS-422 для управления и контроля состояний привода, а так же отслеживать технологию производства закаленной проволоки.

Генератор имеет следующие защиты:

- от внутреннего короткого замыкания, с помощью автоматического выключателя, установленного со стороны питающей сети;
- от токов перегрузки и короткого замыкания на выходе – электронная, расположена в блоке управления;
- от превышения выходного напряжения – электронная, расположена в блоке управления;
- от перегрузки силовых транзисторов – электронная, расположена в блоке управления;
- от перегрева силового модуля, с помощью термоконтакта.

Реализация генератора по схеме "неуправляемый выпрямитель - импульсный регулятор постоянного тока - инвертор тока" обеспечивает высокий коэффициент мощности во всем диапазоне регулирования, плавный пуск, регулирование и эффективную защиту преобразователя.

Применение инвертора тока позволяет исключить протекание больших реактивных токов через полупроводниковые приборы и дает

возможность транспортировать энергию до индуктора с минимальными потерями. Мягкое переключение транзисторов инвертора обеспечивает минимальные динамические потери мощности в них.

## РАЗДЕЛ 6. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ НАГРЕВ И ОХЛАЖДЕНИЕ

### 6.1. Термоэлектрические явления

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.6.1,а). В цепи, замкнутой на миллиамперметр, можно обнаружить электрический ток, который будет протекать до тех пор, пока температуры спаев будут различны.

ТермоЭДС, мкВ, может быть определена как:

$$E = e \cdot (T_2 - T_1) , \quad (6.1)$$

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

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



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.

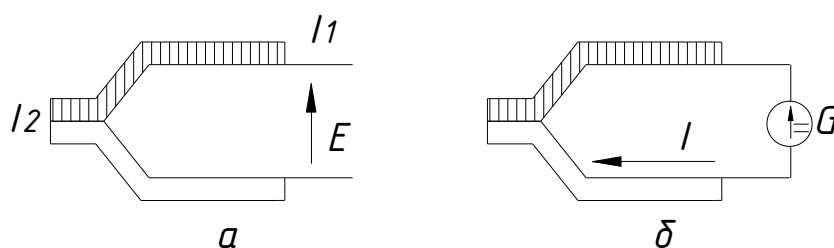


Рис. 6.1. Термoeлектрические явления Зеебека (а) и Пельтье (б)

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 (рис. 6.1, б). 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:

$$Q_n = \frac{K_n}{\tau} \cdot I , \quad (6.2)$$

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

Между коэффициентами Пельтье и Зеебека существует связь:

$$K_n = e \cdot T , \quad (6.3)$$

где  $T$  - температура спая, К.

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

$$Q_{том} = \frac{K_T}{T_2 - T_1} \cdot \tau , \quad (6.4)$$

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

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 в 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.

## 6.2. Термоэлектрические тепловые насосы

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 (рис. 6.2, а).

Ветви 1 термоэлемента соединяют, металлической пластиной 2. 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  $Q_{II}$  в соответствии с зависимостью (6.2):

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

$$Q_{1n} = e \cdot T_1 \cdot I . \quad (6.6)$$

$$Q_{2n} = e \cdot T_2 \cdot I . \quad (6.7)$$

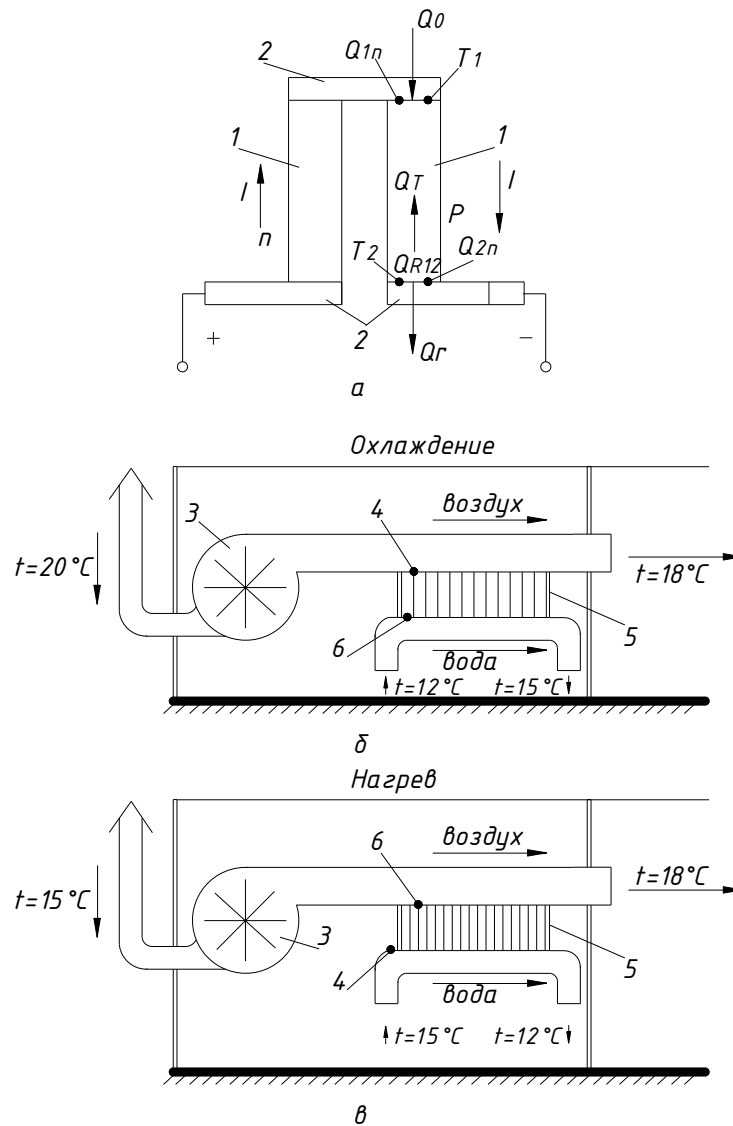


Рис. 6.2. Схема термоэлемента (а) и термоэлектрического полупроводникового насоса, применяемого для охлаждения (б) и нагрева (в) воздуха: 1 – ветвь термоэлемента; 2 – металлическая пластина; 3 – приточный вентилятор; 4 и 6 – холодные и горячие спаи; 5 – тепловой насос

Холодному спаю от окружающей среды сообщается теплота  $Q_0$ . Кроме того, по ветвям термоэлемента вследствие их теплопроводности от горячего спаи 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 спаи может быть записано в следующем виде:

$$Q_0 + Q_T + 0,5 \cdot Q_R = Q_{1n} . \quad (6.8)$$

Из уравнения (6.8) теплота, забираемая от окружающей среды:

$$Q_0 = Q_{1n} - Q_T - 0,5 \cdot Q_R . \quad (6.9)$$

Уравнение теплового баланса для горячего спая запишется так:

$$Q_{2n} + 0,5 \cdot Q_R = Q_T + Q_r , \quad (6.10)$$

где  $Q_r$  - теплота, передаваемая горячим спаем нагреваемому объекту.

Из уравнения (6.10) получаем:

$$Q_r = Q_{2n} + 0,5 \cdot Q_R - Q_T . \quad (6.11)$$

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

$$P = Q_r - Q_0 . \quad (6.12)$$

С учетом формул (6.5) и (6.6), а также отношений (6.9) и (6.11) уравнение (6.12) можно переписать в следующем виде:

$$P = e \cdot I \cdot (T_2 - T_1) + I^2 \cdot R , \quad (6.13)$$

где  $R$  - сопротивление ветви термоэлемента, Ом.

Из анализа уравнения (6.13) 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.

Для анализа энергетической эффективности тепловых насосов обратимся к уравнению (6.12), которое можно переписать в таком виде:

$$1 = \frac{Q_r}{P} - \frac{Q_0}{P} . \quad (6.14)$$

Так как отношение  $Q_r/P = k_{OT}$  представляет собой отопительный коэффициент, а отношение  $Q_0/P = k_x$  - холодильный, можно получить известное из термодинамики соотношение:

$$k_{OT} = k_x + 1 . \quad (6.15)$$

При использовании современных полупроводниковых материалов  $k_{OT}$  полупроводникового теплового насоса достигает 5. С учетом уравнения (6.15)

$$k_{OT} = \frac{Q_{2П} + 0,5 \cdot Q_R - Q_T}{e \cdot I \cdot (T_2 - T_1) + I^2 \cdot R} . \quad (6.16)$$

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

Наиболее экономичным с точки зрения потребления электрической энергии является режим работы теплового насоса, при котором отопительный или холодильный коэффициенты максимальные. При работе в режиме охлаждения максимальному холодильному коэффициенту соответствует определенный ток в цепи термоэлемента. Это объясняется тем, что при больших значениях тока теплота Ленца – Джоуля  $Q_R$ , пропорциональная квадрату тока, превышает теплоту Пельтье  $Q_{П}$ , пропорциональную, т.е. вместо охлаждения будет происходить нагрев. При работе в режиме нагрева экстремальная зависимость отопительного коэффициента от тока отсутствует.

Холодо- и теплоподачу тепловых насосов регулируют, изменяя силу тока, протекающего по термоэлементам. Регулирование может быть непрерывным или по принципу включено-выключено. Последнее отличается большей простотой, но меньшей экономичностью, так как через ветви термоэлементов, имеющих высокую теплопроводимость, при отключении питания возникает большая передача теплоты.

Для питания термоэлектрических нагревательных и холодильных устройств используют источники постоянного тока или тока с незначительной пульсацией. Наиболее распространены выпрямители однофазного переменного тока с последующим сглаживанием пульсации в фильтре. Чтобы получить нужное напряжение, применяют понижающий трансформатор и одно- или двухполупериодные схемы выпрямления. Для

сглаживания пульсации применяют, как правило, индуктивные фильтры, включенные последовательно с термобатареей, или аккумуляторы, соединяемые параллельно с термобатареей. В случае трехфазного выпрямления фильтр обычно не ставят, так как пульсация при этом незначительная.

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 (рис. 6.2. б). Легкий переход с охлаждения на нагрев и, следовательно, большая гибкость по сравнению с обычными системами дают значительные преимущества термоэлектрическим кондиционерам.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Альтгаузен, А.П. Низкотемпературный электронагрев [Текст] / А.П. Альтгаузен, М.Б. Гутман, С.А. Малышев [и др.]; под ред. А.Д. Свенчанского. – М.: Энергия, 1978. – 208 с.
2. Баранов, Л.А. Светотехника и электротехнология [Текст] / Л.А. Баранов, В.А. Захаров. – М.: КолосС, 2006. – 344 с.
3. Басов, А.М. Электротехнология [Текст] / А.М. Басов, В.Г. Быков, А.В. Лаптев, В.Б. Файн. – М.: Агропромиздат, 1985. – 256 с.
4. Белавин, Ю.А. Трубчатые электрические нагреватели и установки с их применением [Текст] / Ю.А. Белавин, М.А. Евстигнеев, А.Н. Чернявский. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 160 с.
5. Герасимович, Л.С. Низкотемпературные электронагреватели в сельском хозяйстве [Текст] / Л.С. Герасимович, В.П. Степанцов, В.А. Коротинский [и др.]; под общ. ред. Л.С. Герасимовича. – Мн.: Урожай, 1984. – 118 с.
6. Егиязаров, А.Г. Отопление и вентиляция зданий и сооружений сельскохозяйственных комплексов [Текст] / А.Г. Егиязаров. – М.: Стройиздат, 1981. – 299 с.
7. Живописцев, Е.Н. Электротехнология и электрическое освещение [Текст] / Е.Н. Живописцев, О.А. Косицын. – М.: Агропромиздат, 1990. – 303 с.
8. Каган, В.Г. Электротермическое оборудование для сельскохозяйственного производства [Текст] / Н.Б. Каган, В.Г. Кауфман, М.Г. Пронько [и др.]. – М.: Энергия, 1980. – 192 с.
9. Карасенко, В.А. Электрификация тепловых процессов в животноводстве [Текст] / В.А. Карасенко. – Минск: Ураджай, 1976. – 160 с.
10. Карасенко, В.А. Электротехнология [Текст] / В.А. Карасенко, Е.М. Заяц, А.Н. Баран, В.С. Корко. – М.: Колос, 1992. – 304 с.



11. Кудрявцев, И.Ф. Электрический нагрев и электротехнология [Текст] / И.Ф. Кудрявцев, В.А. Карасенко. – М.: Колос, 1975. – 384 с.
12. Материалы для электротермических установок: Справочное пособие [Текст] / под ред. М.Б. Гутмана. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 296 с.
13. Практикум по электротехнологии [Текст]: учебн. пособие для вузов / В.Н. Гайдук, В.Н. Шмигель. – М.: Агропромиздат, 1989.
14. Расстригин, В.Н. Электронагревательные установки в сельскохозяйственном производстве [Текст] / В.Н. Расстригин, И.И. Дацков, Л.И. Сухарева, В.М. Голубев; под общ. ред. В.Н. Расстригина. – М.: Агропромиздат, 1985. – 304 с.
15. Расстригин, В.Н. Применение систем и средств электротеплоснабжения в животноводстве [Текст] / В.Н. Расстригин, С.А. Растимешин, С.С. Трунов [и др.]. – М.: ВНИИТЭИСХ, 1985. – 61 с.
16. Справочник инженера-электрика сельскохозяйственного производства [текст]: учебное пособие. – М.: Информагротех, 1999. – 536 с.
18. Электротермическое оборудование [Текст]: справочник. / под ред. А.П. Альтгаузена. – 2-е изд. – М. Энергия, 1980.
19. Электротехнический справочник в 4 т. [Текст]: Т. 4. Использование электрической энергии / под общ. ред. профессоров МЭИ В.Г. Герасимова [и др.] (гл. ред. А.И. Попов). – 9-е изд. стер. – М.: Издательство МЭИ, 2004. – 696 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	
Электротермия. Раздел 1. Общие вопросы электротермии и применение её в сельскохозяйственном производстве.....	
1.1. Электротермия и сельскохозяйственное производство.....	
1.2. Термины и определения электротермии.....	
1.3. Закономерности преобразования электрической энергии в тепловую.....	
1.4. Классификация электротермических установок .....	
1.5. Задачи и содержание проектирования электротермических установок .....	
Раздел 2. Тепловой расчёт ЭТУ.....	
2.1. Основы динамики электронагрева.....	
2.2. Уравнение теплового баланса.....	
2.3. Определения мощности и основных конструктивных размеров электротермической установки.....	
2.4. Определение теплового КПД и удельного расхода электрической энергии.....	
2.5. Выбор тепловой изоляции.....	
2.6. Схемы включения нагревательных элементов и способы регулирования мощности электротермических установок.....	
Раздел 3. Электрический нагрев методом сопротивления.....	
3.1. Способы электрического нагрева сопротивлением .....	
3.2. Электрическое сопротивление проводников .....	
3.3. Электроконтактный нагрев .....	
3.4. Расчёт и выбор нагревательных трансформаторов .....	
3.5. Электроконтактная сварка .....	
3.6. Электродный нагрев. Материалы электродов.....	

3.7. Допустимая плотность тока на электродах и напряжённость электрического поля.....	
3.8. Расчёт электродных нагревательных устройств.....	
3.9. Косвенный электронагрев сопротивлением. Требования к материалам и конструкция нагревательных элементов.....	
3.10. Трубчатые электрические нагреватели.....	
3.11. Электрический и конструктивный расчёты нагревательных элементов.....	
3.12. Особенности расчёта стальных нагревателей.....	
3.13. Нагревательные провода и кабели.....	
3.14. Расчет нагревательных проводов и кабелей .....	
Раздел 4. Электродуговой нагрев.....	
4.1. Свойства и характеристики электрической дуги.....	
4.2. Зажигание, устойчивость горения и регулирование тока дуги...	
4.3. Режимы сварки и работы источников питания сварочной дуги.	
4.4. Источники питания сварочной дуги .....	
Раздел 5. Индукционный нагрев и диэлектрический нагрев.....	
5.1. Особенности индукционного нагрева и его основные физические закономерности .....	
5.2. Индукторы. Конструктивное исполнение и область применения.....	
5.3. Коэффициент полезного действия и коэффициент мощности при индукционном нагреве .....	
5.4. Режимы индукционного нагрева .....	
5.5. Расчёт индукционных нагревателей на промышленной частоте	
5.6. Основы диэлектрического нагрева и его особенности .....	

5.7. Выбор частоты и напряженности электрического поля при диэлектрическом нагреве.....	
5.8. Расчёт конденсатора для диэлектрического нагрева.....	
5.9. Источники питания установок индукционного и диэлектрического нагрева.....	
5.10. Современные источники питания индукционных установок...	
Раздел 6. Термоэлектрический нагрев и охлаждение.....	
6.1. Термоэлектрические явления.....	
6.2. Термоэлектрические тепловые насосы.....	
Библиографический список.....	
Оглавление.....	
Приложение 1 Электронагреватели трубчатые .....	

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

### 1.1. ГОСТ 13268-88 ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛИ ТРУБЧАТЫЕ

(выдержки из текста)

#### 1. Термины и определения

1.1. **Трубчатый электронагреватель (ТЭН)** – электрический нагреватель сопротивления, состоящий из нагревательного элемента, имеющего на концах контактные стержни, запрессованного вместе с наполнителем в металлическую оболочку в соответствии с чертежом.

1.2. **Нагревательный элемент** – металлический проводник, выполненный из сплава с высоким удельным сопротивлением.

1.3. **Наполнитель** – уплотненный изолирующий материал, окружающий электронагревательный элемент.

1.4. **Герметизация торцов** – заполнение торцов ТЭН материалом, обеспечивающим защиту наполнителя от влияния на него влаги.

1.5. **Контактный стержень** – токоведущая металлическая деталь, служащая для подключения ТЭН к сети питания.

1.6. **Активная длина** – часть ТЭН, в которой размещается нагревательный элемент.

1.7. **Активная поверхность** – поверхность ТЭН на его активной длине.

1.8. **Развернутая длина** – сумма длин прямолинейных и изогнутых участков ТЭН.

1.9. **Удельная поверхностная мощность ТЭН** – мощность, приходящаяся на  $1 \text{ см}^2$  активной поверхности.

1.10. **Сопротивление изоляции ТЭН** – электрическое сопротивление изоляционного материала, измеренное между токоведущими частями и металлической оболочкой.

1.11. **Условия нормальной эксплуатации** – условия работы, для которых предназначен конкретный тип ТЭН.

1.12. **Условия нормальной теплоотдачи** – условия теплоотдачи, когда ТЭН работает в нормальных условиях эксплуатации.

1.13. **Рабочая температура** – температура на активной части оболочки ТЭН, которая возникает при эксплуатации в условиях нормальной теплоотдачи при нормальных напряжениях.

1.14. **Холодное состояние ТЭН** – термическое состояние, при котором температура любой части ТЭН отличается не более чем на 3°C от температуры окружающей среды.

1.15. **Установившийся режим** – состояние, при котором превышение температуры ТЭН или его части в течение 30 минут изменяется не более чем на 3°C или на 2,5% в зависимости от того, что больше.

1.16. **Горячее (рабочее) состояние ТЭН** – состояние ТЭН при установившемся режиме в условиях нормальной теплоотдачи.

1.17. **Номинальная потребляемая мощность ТЭН** – мощность, потребляемая ТЭН в условиях нормальной теплоотдачи при рабочей температуре, указанная изготовителем на изделии.

1.21. **Типопредставитель** – изделие из ряда однотипных, сходных по конструкции и объединенных общими требованиями.

## **2. Основные параметры и размеры**

2.1. ТЭН должны изготавливаться на следующие номинальные напряжения 12; 24; 36; 42; 48; 60; 127; 220; 380 В. Допускается изготовление ТЭНов, предназначенных для последовательного соединения, на напряжения  $\sqrt{3}$ ,  $1/\sqrt{3}$ ,  $\sqrt{3}$  от указанных номинальных значений напряжений. По согласованию между изготовителем и потребителем допускается изготавливать ТЭН на другие номинальные напряжения.

2.2. ... Предельные отклонения ТЭН с развернутыми длинами до 1000 мм не должны превышать  $\pm 2\%$  (но не более 12мм), а свыше 1000 мм -

$\pm 1\%$ . По согласованию изготовителя с потребителем допускается увеличение предельных отклонений по номинальной развернутой длине....

2.4. Номинальные длины контактных стержней в заделке и соответствующие им условные обозначения должны соответствовать указанным в таблице:

Номинальная длина контактных стержней в заделке, мм	40	65	100	125	160	250	400	630
Условное обозначение	A	B	C	D	E	F	G	H

2.5. Диаметры ТЭН и их предельные отклонения должны соответствовать указанным в таблице:

Номинальный диаметр, мм:	Предельные отклонения
6,5; 8,0; 8,5; 9,5; 10,0	+0,3 -0,1
13,0; 16,0	+0,4 -0,2

### 3. Технические требования

3.5. Отклонение потребляемой мощности ТЭН при номинальном напряжении не должно превышать  $+5\%$   $-10\%$  от номинальной потребляемой мощности для ТЭН с активным сопротивлением свыше 10 Ом и  $\pm 10\%$  для ТЭН с активным сопротивлением менее 10 Ом....

3.9. Сопротивление изоляции ТЭН в холодном состоянии должно быть не менее 0,5 МОм, а при приемо-сдаточных испытаниях на заводе-изготовителе – не менее 50 МОм. ...

3.11. Изоляция ТЭН в холодном состоянии должна выдерживать испытательное синусоидальное напряжение частотой 50 Гц, указанное в таблице:

Номинальный диаметр ТЭН, мм	Испытательное напряжение при номинальном напряжении ТЭН, В			
	от 12 до 60	127	220	380
16,0; 13,0	800	1500	1700	2000
10,0; 9,5; 8,5; 8,0	500	1000	1250	1800
6,5	500	1000	1250	-

#### **4. Правила испытаний**

4.1. Для контроля соответствия ТЭН требованиям настоящего стандарта изготовитель должен проводить приемо-сдаточные, периодические, типовые испытания.

4.2. Приемо-сдаточным испытаниям подвергают каждый ТЭН. При этом контролируется соответствие ТЭНа требованиям п. 3.5 (в холодном состоянии) и п. 3.11.

Допускается дополнительно контролировать соответствие ТЭНа требованиям п.3.9....

#### **5. Методы испытаний**

5.6. Изоляцию ТЭН в холодном состоянии (п.3.11) испытывают путем приложения испытательного напряжения между одним из выводов и оболочкой и выдержки в течение 1 минуты; в начале испытания прикладывают не более половины испытательного напряжения, которое затем быстро повышают до полного значения. Во время испытаний не должно происходить поверхностного перекрытия или пробоя изоляции.

При приемо-сдаточных испытаниях допускается проводить испытания в течение 1 секунды при условии повышения испытательного напряжения на 25%....

5.7... При приемо-сдаточных испытаниях допускается проверять потребляемую мощность в холодном состоянии измерением активного сопротивления ТЭН измерительным мостом или омметром.

Коэффициент приведения активного сопротивления, измеренного в холодном состоянии ТЭН, к сопротивлению в горячем состоянии должен соответствовать указанному в конструкторской документации.

#### **6. Маркировка, упаковка, транспортирование**

6.2 Маркировка должна содержать:

1) условное обозначение материала оболочки и нагревательной среды или тип ТЭН;



- 2) номинальное напряжение, В;
- 3) номинальную потребляемую мощность, кВт;
- 4) ... год выпуска (последние две цифры) ...

6.8. Хранение ТЭН должно осуществляться в отапливаемых и вентилируемых складах. Температура окружающего воздуха – от 5 до 40 °С. Среднее значение относительной влажности – до 65% при 20°С....

### ПРИЛОЖЕНИЕ (обязательное)

1. Характерные случаи применения ТЭН и удельные поверхностные мощности в зависимости от условий эксплуатации и материал оболочки приведены в таблице:

Условное обозначение нагреваемой среды	Нагреваемая среда	Характер нагрева	Удельная мощность, Вт/см <sup>2</sup> , не более	Материал оболочки ТЭН
X	Вода, слабый раствор щелочей и кислот (рН от 5 до 9)	Нагревание, кипение с максимальной температурой на оболочке 100°С	9,0	Меди и латунь (с покрытиями)
J	Вода, слабый раствор кислот (рН от 5 до 7)	То же	15,0	Нержавеющая жаростойкая сталь
P	Вода, слабый раствор щелочей (рН от 7 до 9)	То же	15,0	Углеродистая сталь
Q	Вода, слабый раствор кислот (рН от 5 до 7)	То же	9,5	Алюминиевые сплавы
S	Воздух и пр. газы и смеси газов	Нагрев в спокойной газовой среде до рабочей температуры на оболочке ТЭН 450°С	2,2	Углеродистая сталь
T	Воздух и пр. газы и смеси газов	Нагрев в спокойной газовой среде до рабочей температуры на оболочке ТЭН 450°С	5,0	Нержавеющая жаропрочная сталь
O	То же	Нагрев в среде с движущимся со скоростью 6 м/с воздухом до рабочей	5,5	Углеродистая сталь

		температуры на оболочке ТЭН 450°C		
K	То же	Нагрев в среде с движущимся со скоростью не менее 6 м/с воздухом, с рабочей температурой на оболочке ТЭН св. 450°C	6,5	Нержавеющая жаростойкая сталь
R	То же	Нагрев в среде с движущимся со скоростью менее 6 м/с воздухом до рабочей температуры на оболочке ТЭН 450°C	3,1	Углеродистая сталь
N	То же	Нагрев движущимся со скоростью менее 6 м/с воздухом, с рабочей температурой на оболочке ТЭН свыше 450°C	5,1	Нержавеющая жаростойкая сталь
Z	Жиры, масла	Нагрев в ваннах и др. емкостях	3,0	Углеродистая сталь
V	Щелочь, щелочно-селитровая смесь	Нагрев и плавление в ваннах и других емкостях с рабочей температурой на оболочке ТЭН до 600°C	3,5	Углеродистая сталь
W	Легкоплавкие металлы: олово, свинец и др.	То же, с рабочей температурой на оболочке ТЭН до 450°C	3,5	Углеродистая сталь
L	Литейные формы, пресс-формы	ТЭН вставлены в отверстия. Имеется гарантированный контакт с нагреваемым металлом. Нагрев с рабочей температурой на оболочке ТЭН до 450°C	5,0	Углеродистая сталь
Y	Металлические плиты из алюминиевых сплавов	ТЭН залиты в изделия. Работа с термоограничителями с рабочей температурой на оболочке ТЭН до 320°C	13,0	Углеродистая сталь

2. Конец контактного стержня ТЭН изогнутой конфигурации должен находиться только на прямом участке на расстоянии не менее 20,0 мм от началагиба для ТЭН диаметрами 10,0; 13,0; 16,0 мм и не менее 10 мм для ТЭН диаметрами 6,5; 8,0; 8,5; 9,5 мм.

### 3. Указание по эксплуатации

#### 3.1. Перед эксплуатацией ТЭН проверяют:

1) сопротивление изоляции (при его падении ниже 0,5 МОм или увеличении тока утечки более 0,75 мА/кВт ТЭН следует просушить при температуре 120...150 °С в течение 4...6 часов);

2) надежность заземления;

3) защиту токоведущих частей от случайного к ним прикосновения и попадания брызг (все монтажные и ремонтные работы следует проводить при снятом напряжении).

#### 3.2. При эксплуатации ТЭН:

1) необходимо следить за состоянием контактных стержней и токоподводящих проводов, не допуская ослабления соединения;

2) при подтягивании контактных гаек не допускается проворачивания контактных стержней в корпусе ТЭН;

3) активная часть ТЭН должна быть полностью расположена в рабочей среде;

4) при нагревании твердых тел (деталей штампов, пресс-форм, литейных форм) должен быть обеспечен надежный тепловой контакт оболочки с нагреваемой средой.

3.3. Не допускается крепление ТЭН за контактные стержни и эксплуатация ТЭН при температуре выше указанной в таблице п. 1 настоящего приложения

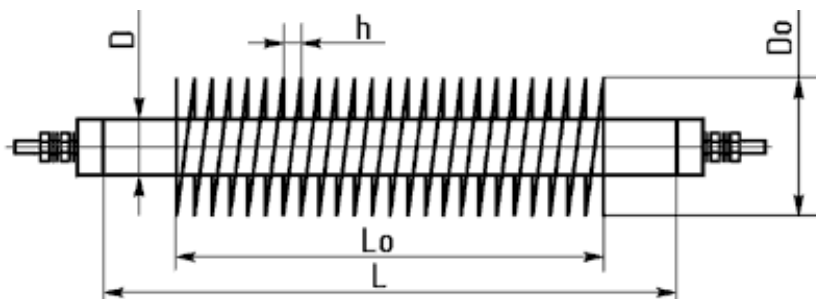
## 1.2. ТРУБЧАТЫЕ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

**Трубчатые электронагреватели с оребрением** применяются для нагрева движущегося или спокойного воздуха и используются в промышленных и бытовых электрокалориферах, конвекторах, тепловых пушках и в других установках. Крайне редко оребренные ТЭН применяются для нагрева жидкостей.

### **Конструкция оребренных ТЭНов:**

ТЭН представляет собой двухконцевой трубчатый электронагреватель круглого сечения с плотно прилегающим к его активной поверхности оребрением, выполненным из стальной гофрированной ленты навитой на оболочку ТЭН по спирали. Внутренняя конструкция оребренного электронагревателя аналогична конструкции двухконцевого ТЭН. Оребрение изготавливается из ленты толщиной 0,3 мм, шириной 10 мм.

С целью соблюдения однородности материала и недопущения разницы в коэффициентах теплового расширения оболочки ТЭН и оребрения, лента используется из нержавеющей или из углеродистой стали.



**Рис. 1 Оребренный ТЭН, показано:  $L$  – развернутая длина;  $L_0$  – длина оребрения;  $D$  – диаметр оболочки;  $D_0$  – диаметр оребрения;  $h$  – шаг оребрения.**

Оребрение позволяет увеличить площадь поверхности и как следствие снизить ваттную нагрузку электронагревателя в 2...2,5 раза. ТЭН могут оснащаться крепежной арматурой в виде штуцеров, планок и

т.п., соединенных с оболочкой методом сварки, пайки или прессовки и предназначенных для крепления нагревателей в комплектующих установках. ТЭН могут быть прямые и согнутые (чаще всего в одной плоскости).

Пример условного обозначения оребренных ТЭНов:

**ТЭНР-60В13/2,00Т220:**

**60** – развернутая длина, см; **В** – условное обозначение длины контактных стержней, мм (А – 40мм; В – 65мм; С – 100 мм; D – 125 мм; E – 165 мм; F – 250 мм; G – 400 мм; H – 630 мм); **13** – диаметр, мм; **2,00** – номинальная мощность, кВт; **Т** – условное обозначение нагреваемой среды и материала оболочки (таблица 1); **220** – номинальное напряжение, В.

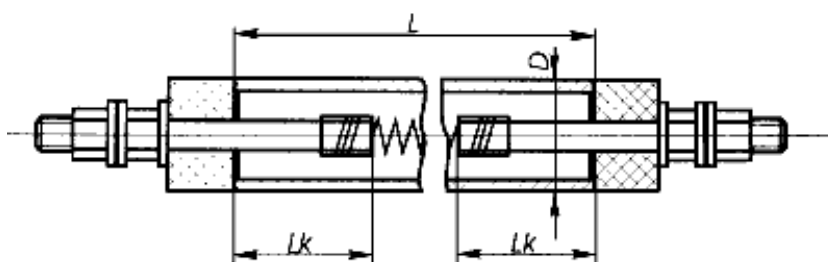
Таблица №1      **Условное обозначение нагреваемой среды и материала оболочки**

<b>условное обозначение</b>	<b>нагреваемая среда</b>	<b>материал оболочки</b>
P	вода, слабые растворы щелочей	углеродистая сталь
J	вода, слабые растворы кислот	нержавеющая сталь
X	вода, слабые растворы щелочей и кислот	медь и латунь
Q	вода, слабые растворы кислот	алюминиевые сплавы
S	спокойный воздух, газы или смеси газов	углеродистая сталь
T	спокойный воздух, газы или смеси газов	нержавеющая сталь
O	движущийся воздух, газы или смеси газов (V свыше 6 м/с)	углеродистая сталь
K	движущийся воздух, газы или смеси газов (V свыше 6 м/с)	нержавеющая сталь
R	движущийся воздух, газы или смеси газов (V свыше 6 м/с)	углеродистая сталь
N	движущийся воздух, газы или смеси газов (V свыше 6 м/с)	нержавеющая сталь
Z	жиры, масла	углеродистая сталь
W	легкоплавкие металлы	углеродистая сталь
L	литейные формы, пресс-формы	углеродистая сталь
Y	металлические плиты из алюминиевых сплавов	углеродистая сталь
V	щелочь, щелочно-селитровая смесь	углеродистая сталь
D	селитра	двойная оболочка (углерод.ст. + нерж.ст.)
Ti	агрессивные среды	титан

**Трубчатые электронагреватели (ТЭН)** предназначены для нагрева различных сред путем конвекции, теплопроводности и излучения посредством преобразования электрической энергии в тепловую и применяются в качестве комплектующих изделий в промышленных установках и бытовых нагревательных приборах.

**ТЭН двухконцевые имеют следующее устройство:**

Конструкция двухконцевого трубчатого электронагревателя круглого сечения представляет собой расположенный внутри металлической оболочки нагревательный элемент (спираль или несколько спиралей из сплава с высоким сопротивлением) с контактными стержнями. От оболочки нагревательный элемент изолирован спрессованным электроизоляционным наполнителем. Для предохранения от попадания влаги из окружающей среды торцы ТЭН герметизируют. Контактные стержни изолируются от оболочки диэлектрическими изоляторами.



**Рис. 2 ТЭН, где показано: D - диаметр оболочки; L - развернутая длина ТЭН; Lk - длина контактного стержня в заделке**

Примеры условного обозначения трубчатых электронагревателей различных типов:

**ТЭН-60 В 13/1,25 J 220:**

**60** – развернутая длина, см; **В** – условное обозначение длины контактных стержней, мм (А – 40мм; В – 65мм; С – 100 мм; D – 125 мм; E – 165 мм; F – 250 мм; G – 400 мм; H – 630 мм); **13** – диаметр, мм; **1,25** – номинальная мощность, кВт; **J** – условное обозначение нагреваемой среды и материала оболочки (таблица 1); **220** – номинальное напряжение, В.

**Н 1 Ж 2 3**

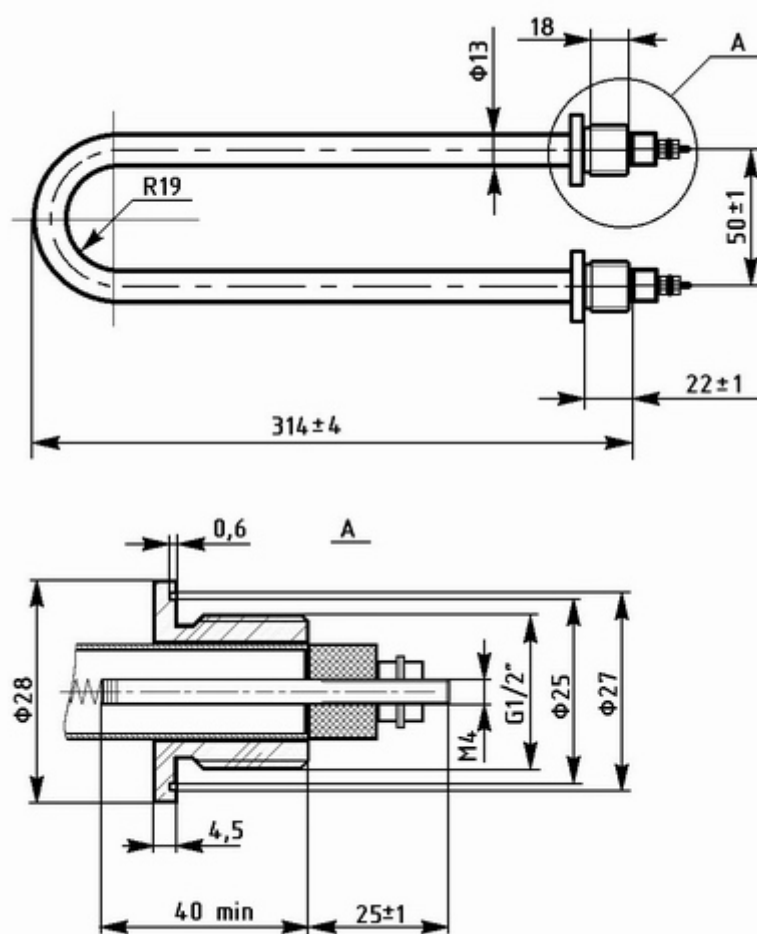
Н – нагреватель; 1 – В – воды; ВС – воздуха; ММ – масла; Ж – с жаропрочной оболочкой; 2 – развёрнутая длина, м; 3 – номинальная мощность, кВт.

### ***ТЭН – 123/456***

Т – трубчатый; Н – нагреватель; Э – электрический; 1 - развёрнутая длина, см; 2 – условное обозначение длины контактного вывода (А; Б; В; Г; Д; Е; Ж; З), мм (40, 65, 100, 125, 160, 250, 400, 630 мм); 3 – наружный диаметр оболочки, мм; 4 - номинальная мощность, кВт; 5 - условное обозначение нагреваемой среды (П; Р; Х вода, слабый раствор щелочей и кислот; Т; С; О; К; Э; Н – воздух, газы, окиси газов; И – пищевые жиры и минеральные масла; Ф – легкоплавкие металлы, олово, свинец и т.д.); 6 – номинальное напряжение, В.

### ***ЭТ – 1***

Э – электронагреватель; Т – трубчатый; 1 - развёрнутая длина, см.



**Рис. 3 Внешний вид согнутого ТЭН, используемого для нагрева воды и водных растворов**

По конфигурации, конструктивному исполнению и назначению ТЭНы имеют широкий диапазон параметров: 1) по рабочему напряжению от 12 до 660В; 2) по номинальной мощности от десятков Вт до десятков

кВт; 3) по длине от нескольких сантиметров до 6 метров; 4) по конфигурации (таблица 2) как прямые, так и согнутые в различных плоскостях; 5) по назначению для нагрева воздуха, жидкостей, масла, пресс-форм, плавления легкоплавких металлов, селитры; 6) по крепежным элементам форме контактных выводов (рис. 3) как стандартного исполнения, так и специально требующиеся.

Основным правилом при выборе ТЭН для заданной нагреваемой среды является правильное сочетание геометрических и электротехнических параметров. Ресурс и надежность работы ТЭН зависят от того, насколько велика поверхностная нагрузка. Для различных нагреваемых сред **допустимая удельная поверхностная нагрузка** разная и является строго нормативной величиной, превышение которой ведет к преждевременному выходу ТЭН из строя.

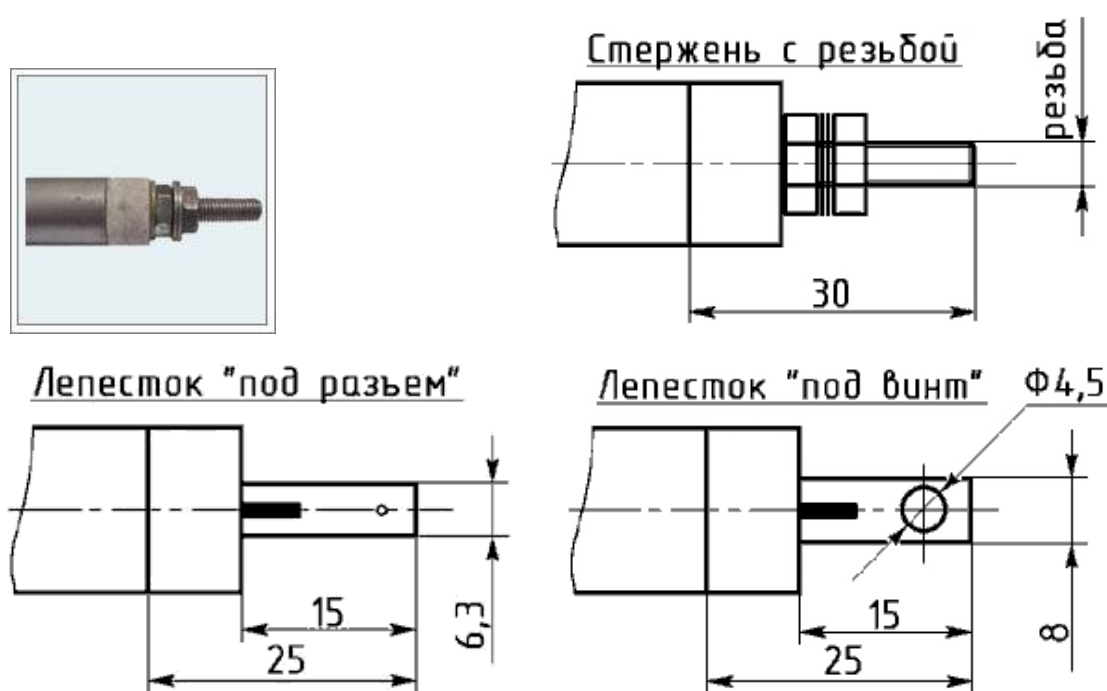
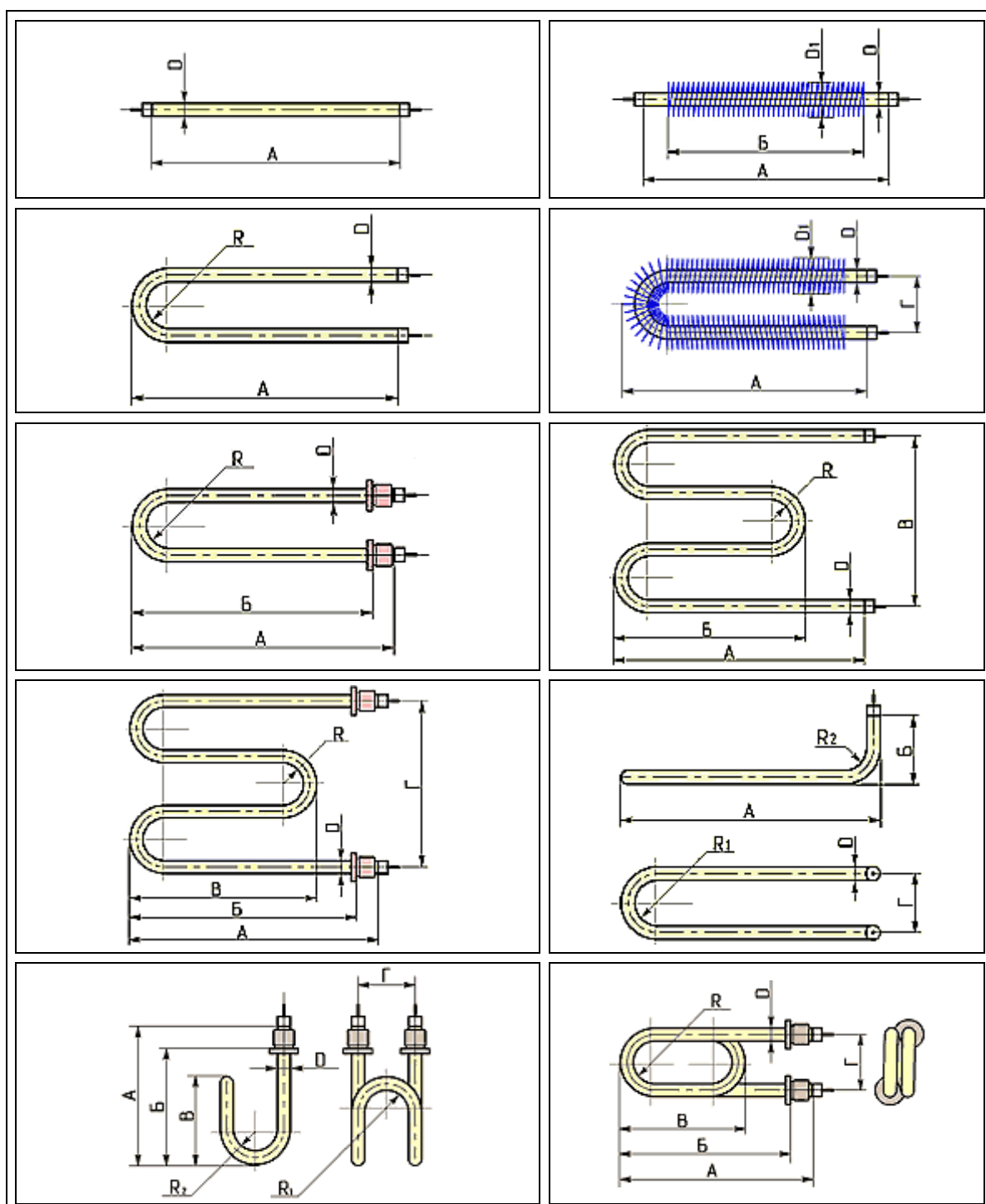


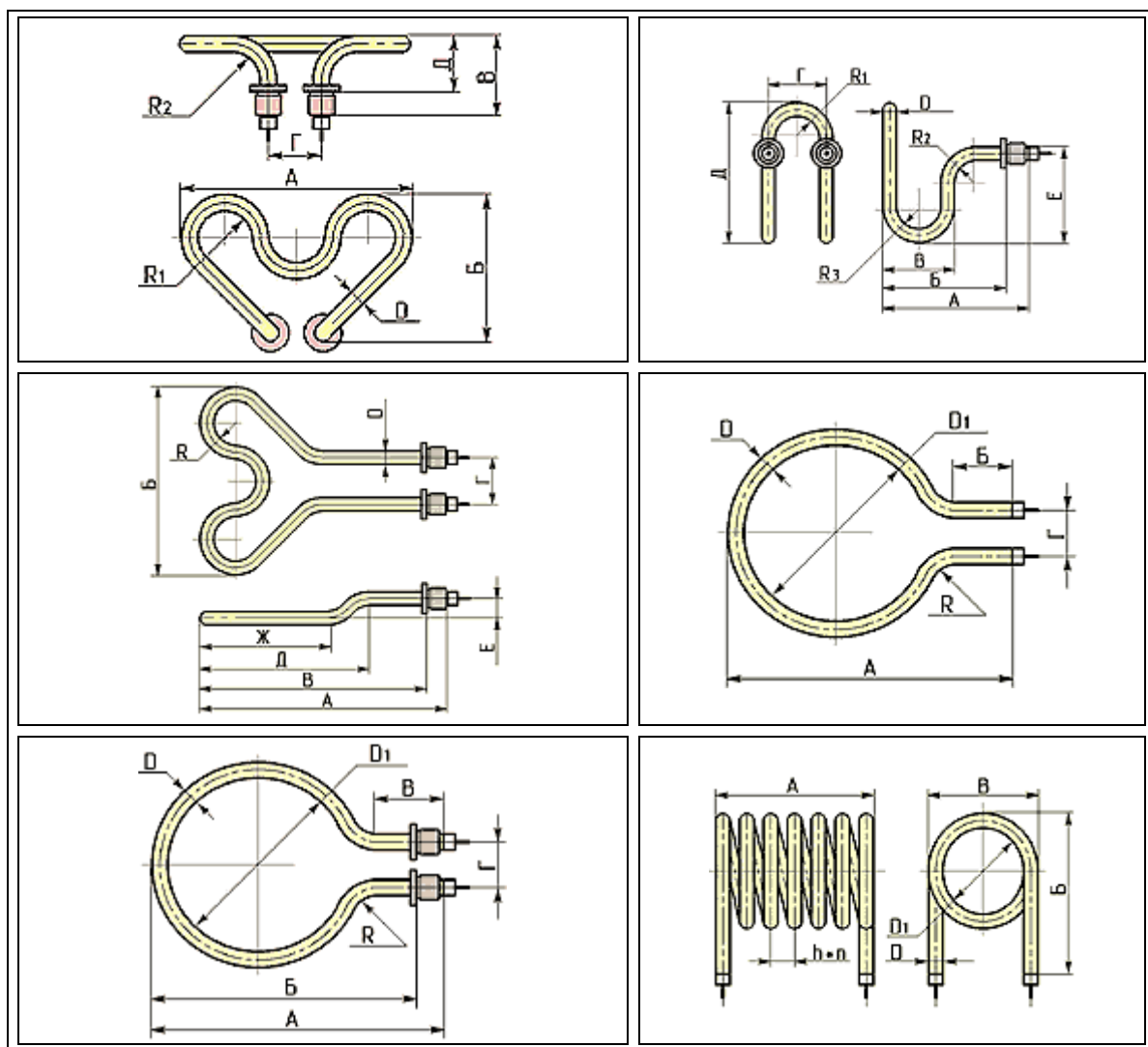
Рис. 3. ТЭН - двухконцевые. Форма контактных выводов



Таблица 2

ТЭН – двухконцевые, варианты конфигураций





**Воздушные трубчатые электронагреватели** предназначены для нагрева воздуха и смесей газов и согласно ГОСТ 13268-88 подразделяются (см. таблицу 3).

Воздушные ТЭН могут быть прямыми и согнутыми в различных плоскостях, оснащаться различными крепежными элементами, ребрятся углеродистой или нержавеющей лентой.

В случаях, если требуется мощность, превышающая максимальную, а посадочные размеры не позволяют увеличить длину ТЭН или их количество, применяют ребренные тэны. Из-за лучших условий теплосъема ребренные ТЭН часто используются в электрокалориферах.

Таблица №3

Технические данные и характеристики воздушных ТЭНов

Характер нагрева	Движущаяся воздушная среда				Спокойная воздушная среда		
Материал оболочки	Углеродистая сталь		Нержавеющая сталь		Углеродистая сталь	Нержавеющая сталь	
Область применения	Электрокалориферы, тепловые завесы, тепловые пушки				Конвекторы, сушильные камеры, печи, сауны		
Скорость движения воздуха	свыше 6 м/с	менее 6 м/с	свыше 6 м/с	менее 6 м/с	—	—	
Условное обозначение по ГОСТ 13268	О	Р	К	Н	С	Т	
Максимальная температура нагреваемой среды, °С	450	450	450	450	400	400	
Максимально допустимая поверхностная нагрузка, Вт/см <sup>2</sup>	5,5	3,5	6,5	5,1	2,2	5,0	
Максимальная мощность (в киловаттах) на 1 метр активной длины ТЭН							
диаметр оболочки, мм	8,5	1,46	0,93	1,73	1,36	0,58	1,33
	10	1,72	1,09	2,04	1,60	0,69	1,57
	13	2,24	1,42	2,65	2,08	0,89	2,04
	16	2,76	1,75	3,26	2,56	1,10	2,51

**Масляные ТЭН.** Масляные трубчатые электронагреватели предназначены для нагрева масла, жиров, битума, других жировых соединений и согласно ГОСТ 13268-88 характеризуются следующим образом (см. таблицу 4).

Таблица №4

Технические данные и характеристики масляных ТЭНов

<b>Характер нагрева:</b> Нагрев в ваннах и других емкостях	
<b>Материал оболочки:</b> Углеродистая сталь	
<b>Область применения:</b> Нагрев пищевых и технических масел, цистерны, фритюрницы, масляные радиаторы...	
<b>Условное обозначение по ГОСТ 13268:</b> Z	
<b>Максимальная температура нагреваемой среды, °С:</b> 250	
<b>Максимально допустимая поверхностная нагрузка, Вт/см<sup>2</sup>:</b> 3,5	
<b>Диаметр оболочки, мм</b>	<b>Максимальная мощность (кВт) на 1 метр активной длины ТЭН:</b>
8,5	0,93 кВт
10	1,09 кВт
13	1,42 кВт
16	1,75 кВт

Масляные ТЭН могут быть согнутыми в различных плоскостях и оснащаться различными крепежными элементами. Также возможно изготовление масляных ТЭН в оболочке из нержавеющей стали и других материалов.

**Учебно-методическое пособие**

Глушков Алексей Максимович  
Юдаев Игорь Викторович

**СВЕТОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ**

Часть II «Электротехнология»: Электротермия

*Курс лекций*

**Редактор Н.Е. Волкова-Алексеева**

Компьютерная вёрстка.....

Подписано в печать.....Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>

Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman. Ризограф.

Уч.-изд. л. 11,5. Усл. печ.л.....Тираж...Заказ...

Изд-во ФГОУ ВПО Волгоградская ГСХА

400002, Волгоград, пр-т Университетский, 26

Отпечатано в.....