

## ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие «Электрический нагрев: основы физики процессов и конструктивных расчетов» ставит своей целью ознакомление студентов, обучающихся на инженерных факультетах аграрных вузов и вузов технического профиля по направлению подготовки бакалавров 35.03.06 «Агроинженерия», профиль «Электрооборудование и электротехнологии», с общими закономерностями преобразования электрической энергии в тепловую, а также методами расчёта, выбора и применения электротермического оборудования, используемого в сельскохозяйственном производстве. В пособии также приведены подробные примеры теплотехнических расчетов; расчетов как элементов электротермического оборудования, так и электронагревательных установок в целом; представлены тестовые задания и контрольные вопросы для оценки освоения и самостоятельного контроля изученного материала.

Раздел «Электрический нагрев» традиционно входит в лекционные курсы по дисциплинам «Светотехника и электротехнология», «Применение электрической энергии в сельском хозяйстве», «Современные электротехнологии и установки на их основе». В связи с этим учебное пособие рекомендуется для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 35.03.06 «Агроинженерия», профиль «Электрооборудование и электротехнологии», в качестве основной и дополнительной литературы для усвоения указанных дисциплин.

В результате освоения раздела «Электрический нагрев» дисциплины «Светотехника и электротехнология» обучающийся должен демонстрировать следующие результаты образования:

- разбираться в энергетических основах электрического нагрева, а также физических основах и закономерностях преобразования электрической энергии в тепловую;
- знать методы и владеть навыками расчета составляющих элементов и особенностями проектирования электротермических устройств и установок;
- знать устройство и принцип действия современного энергосберегающего электротермического оборудования, а также режимов их работы.

# 1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕРМИИ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ И ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАГРЕВА

## 1.1. Электрический нагрев и сельскохозяйственное производство

**Электрический нагрев или электротермия** (от электро... и *греч.* *thérme* — жар, тепло) — прежде всего, это:

- прикладная наука о процессах преобразования электрической энергии в тепловую;
- раздел электротехники, рассматривающий задачи проектирования, изготовления и эксплуатации электротермических установок;
- отрасль энергетики, охватывающая вопросы потребления электрической энергии для нагрева, фазового преобразования материалов и сред и т. п.;
- совокупность технологических процессов с использованием теплового действия электрической энергии в различных отраслях народного хозяйства.

В зависимости от способа преобразования электрической энергии в тепловую различают нагрев: сопротивлением, дуговой, индукционный, диэлектрический, электронный, излучением оптического квантового генератора (лазера), плазменный, термоэлектрический.

Понятие «электротермические установки» включает следующее электро-технологическое оборудование: электрические печи, плазменные реакторы, нагревательные установки, приборы промышленного, коммунального и бытового назначения и т. п. Применение электрической энергии для генерирования теплоты обеспечивает возможность высокой концентрации энергии, вследствие чего может быть получена высокая температура, недостижимая при других способах теплогенерации; создание большой скорости нагрева и, как следствие, компактности конструкции электротермических установок; регулирование температуры и её распределение в рабочем пространстве электротермической установки, что позволяет осуществлять равномерный нагрев в большом объёме 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; создание 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) зоны для защиты нагреваемых материалов и изделий от вредных воздействий воздуха (в частности, уменьшение угара); отсутствие дымовых газов (продуктов сгорания топлива), что позволяет увеличить коэффициент использования теплоты — КПД электротермических установок, обуславливая чистоту их рабочих поверхностей.

Интенсивное развитие электротермии сдерживается недостатками, присущими этому способу генерации теплоты: более высокая стоимость изготовления, комплектации и эксплуатации электротермических установок по сравне-

нию с другими широко используемыми типами нагревателей и печей, например работающими на углеводородном топливе; повышенные требования к технической культуре производства; большой расход дорогих и дефицитных материалов на изготовление электротермического оборудования; меньшая надёжность, долговечность и ремонтпригодность электротермических установок; зависимость работы электротермической установки от режима работы энергосистемы.

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;

- 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.

В энергетическом обеспечении сельскохозяйственного производства на сегодняшний день накопилось немало проблем: дефицит топливно-энергетических ресурсов и постоянный рост их стоимости, низкая энерговооруженность и высокая энергоёмкость производства, недостаток кадров, ненадёжность энергоснабжения потребителей, высокий удельный вес энергоресурсов в стоимости продукции. При этом по уровню энерговооруженности труда отрасли сельского хозяйства в 2...3 раза отстают от отраслей промышленности. Между тем опыт экономически развитых стран показывает, что для эффективного производства сельхозпродукции эти показатели должны быть не ниже общепромышленных. А в таких странах, как США, например, энерговооруженность в сельскохозяйственном производстве в 2,3, Германии — в 2,1, в Швеции — в 1,6 раза выше, чем в промышленности.

Агропромышленный сектор представляет собой крупного потребителя тепловой энергии, основная часть которой тратится на различные технологические нужды. Низкотемпературный электронагрев является наиболее распространенным в сельском хозяйстве. Однако задача использования электроэнергии для теплофикации технологических процессов в сельскохозяйственном производстве и быту на сегодняшний день остается одной из наиболее актуальных.

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

- низкую плотность тепловых нагрузок и большую 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 частым применением низкокалорийного топлива (бурый уголь, дрова и т. п.), что снижает КПД топливных установок до 0,08...0,15 вместо расчетных — 0,35...0,5;

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

- для нормального содержания и развития животных, птиц и растений недопустимость резких колебаний параметров микроклимата.

В сельскохозяйственном производстве большинства развитых стран электроэнергия широко используется в качестве источника тепловой энергии. Так, например, к началу 70-х гг. XX в. 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.

Существующая тенденция возрастания энергоемкости сельскохозяйственной электротермии является отражением более общих процессов, происходящих в мировой практике. Потребность в энергоресурсах удваивается через каждые 10...15 лет. Рост производства сельхозпродукции сопровождается возрастанием энергоемкости технологий её производства. Так, прирост продукции на 1% требует увеличения расхода энергоресурсов на 2...3%. Такой рост энергозатрат характерен и пока неизбежен для всех промышленно развитых стран, несмотря на принимаемые меры по их минимизации. Например, в XX в. удвоение урожаев в США сопровождалось десятикратным повышением расхода энергии.

Фондоотдача для электроотопительного оборудования в сельском хозяйстве в 2...3 раза выше, чем какого-либо другого.

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 г. до 31% в 1993 г., но из-за кризисных моментов развития АПК в 2004 г. эта цифра снизилась до 16...20%. 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. Они составляют основную долю в общих энергозатратах. На ферме с поголовьем 1200 коров установленная мощность технологического оборудования составляла в 80-х гг. прошлого века 21,3%, централизованное отопление и горячее водоснабжение — 28%, электрокалориферы в системах вентиляции — 46,4%, т. е. большая часть энергобаланса приходилась на тепловые процессы. По данным ВИЭСХ, в общем балансе энергии за период 2000–2006 гг., 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 (удельный расход энергии на отопление 1 м<sup>2</sup> площади жилых зданий в России составляет 418 кВт·ч, в то же время в Швеции и Финляндии — 135 кВт·ч, в Германии — 260 кВт·ч, а в США — 55 кВт·ч.). В то же время в конце XX в. в сфере быта и услуг потреблялось уже 40% электрической энергии, и такая 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 — сводит к минимуму применение электродистанционных котлов. Мощные централизованные электродистанционные котлы в середине 80-х гг. прошлого века были призваны заменить котельные, работающие на жидком и твердом топливе. Подобное строительство сопряжено с дополнительными затратами на возведение трубопроводов, их теплоизоляцию, с дополнительными потерями тепла, т. е. связано с недостатками, присущими обычным схемам теплоснабжения. Инженерные расчеты показывают, что в случае рассредоточенности сельскохозяйственных объектов по достаточно большой территории, когда длина тепловых сетей более 0,5...0,6 км, а тепловая нагрузка не превышает 4000 кДж/м, экономически целесообразно применять местные (встроенные) котельные с источниками тепла малой производительности. Исходя из сказанного, более целесообразно превращать электрическую энергию в тепловую 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, т. е. сначала в электрическую на электростанции, а за-

тем 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 с течением времени. Для каждого этапа развития науки и техники, электротехнической промышленности, энерго- и электроснабжения существует наиболее эффективный оптимальный уровень электрификации тепловых процессов, в том числе и в сельском хозяйстве. Этот уровень для конкретного отрезка времени определяется на основании технико-экономического расчета с учетом сложившихся цен на энергоносители и оборудование.

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 технологические, социальные и экологические аспекты широкой электрификации тепловых процессов в сельском хозяйстве.

Повышается продуктивность животноводства и птицеводства, снижается падеж животных и удельный расход 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 массы при откорме скота, снизить на 20...25% расход кормов; снизить на 10...15% — падеж молодняка и увеличить на 30% яйценоскость кур. Быт сельских жителей приближается к городскому с точки зрения повышения комфортности, уменьшения трудозатрат и зависимости от особенностей традиционных систем теплоснабжения. При этом высвобождаются работники, обслуживающие мелкие котельные и огневые установки; благотворно влияет микроклимат на строительные конструкции животноводческих помещений, на технологическое, электросиловое и осветительное оборудование.

Использование тепловых нагрузок в качестве потребителей — регуляторов электрических графиков нагрузки — 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 графика общего электропотребления хозяйств и лучшему использованию электросетевого оборудования, тем более что инструкция РД 34.26.103 «Инструкция 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 по возможности комплектоваться тепловыми аккумуляторами.

При электротеплоснабжении уменьшается стоимость передачи электрической энергии от районной подстанции к потребителю с увеличением электропотребления в хозяйствах.

Та же инструкция РД 34.26.103 устанавливает, что мелким сельскохозяйственным потребителям производственного назначения с общей площадью помещений до  $100 \text{ м}^2$  (вагоны-бытовки, чабанские домики, мастерские, конторы складов, насосные артезианские скважины, станции орошения, очистные сооружения, автозаправочные станции и др.), удаленным от источников тепла на 600 м и более, с общей установленной мощностью электронагревательных приборов до 30 кВт включительно, разрешается использовать электроэнергию для отопления и горячего водоснабжения, а энергонадзорным органам выдавать разрешения без представления технико-экономического обоснования.

Для осуществления тепловых технологических процессов спроектировано и разработано необходимое, достаточно большое количество различного типа теплоэнергетического оборудования — топливного и электротеплового, на базе которых формируются системы теплообеспечения.

Однако производство и поставка отечественного теплоэнергетического оборудования и обеспеченность им производственных объектов (в частности, животноводческих ферм) весьма низкая и составляет менее 40%.

## 1.2. Электрический нагрев проводников, диэлектриков и полупроводников

Хорошо известно из курсов электрофизики, теоретической электротехники и электротехнических материалов, что все материальные объекты с точки зрения их электрофизических свойств разделяются на проводники, полупроводники и диэлектрики (изоляторы).

**Проводниками** называют тела, в которых могут быть созданы электрические токи проводимости. Типичные проводники — это металлы. Основная особенность проводников заключается в наличии в них свободных зарядов (электронов), которые, участвуя в тепловом движении, сталкиваются друг с другом и другими частицами вещества, отдают последним энергию, приобретаемую при движении в электрическом поле, и при этом перемещаются по всему объему проводника. Для поддержания движения зарядов в проводниках должно существовать электрическое поле, которое при движении зарядов совершает работу. Движение электронов сопровождается их соударениями с положительными ионами решеток металлов, вследствие этого можно констатировать, что все проводники обладают сопротивлением электрическому току. То есть нагрев проводника происходит протекающими по нему токами проводимости.

Рассмотрим сущность преобразования электрической энергии в тепловую в проводниковых материалах.

Определим энергию, выделяющуюся в проводнике с удельной проводимостью  $\gamma$ , по которому протекает ток  $I$  (рис. 1.1). Для этого выделим в проводнике бесконечно малый цилиндрический объем  $dV = dl \cdot dS$  с основаниями  $dS$ , которые являются потенциальными и находятся на расстоянии  $dl$  одно от другого.

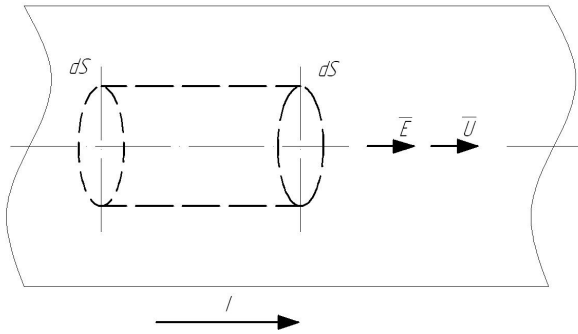
Если ток, протекающий через основание элемента объема  $dI = j \cdot dS$ , а разность потенциалов между торцами рассматриваемого объема  $dU = E \cdot dl$ , то энергия, поглощаемая за единицу времени:

$$dP = dI \cdot dU = j \cdot dS \cdot E \cdot dl = j \cdot E \cdot dV. \quad (1.1)$$

Энергия, выделяемая в единице объема за единицу времени:

$$P_V = \frac{dP}{dV} = j \cdot E = \gamma \cdot E^2 = \frac{E^2}{\rho} = \frac{j^2}{\gamma} = \rho \cdot j^2, \quad (1.2)$$

где  $\rho$  — удельное электрическое сопротивление проводника, Ом·м.



**Рис. 1.1**

*Проводник в электрическом поле*

Энергию, выделенную в единице объема за единицу времени, называют удельной мощностью.

Равенство (1.2) является аналитическим выражением закона Ленца — Джоуля в наиболее общей дифференциальной форме и может быть применено для любых проводников независимо от их формы и размера.

Пользуясь выражением (1.2), можно определить мощность, поглощенную в проводящей среде объемом  $V$ :

$$P = \int_V E^2 \cdot dV = \int_V \rho \cdot j^2 \cdot dV. \quad (1.3)$$

Если в рассматриваемом объеме  $\rho = const$  и  $j = const$ , то:

$$P = \rho \cdot j^2 \cdot \int_V dV = \rho \cdot j^2 \cdot V = \rho \cdot j^2 \cdot S \cdot l = \frac{\rho \cdot I^2 \cdot l}{S} = R \cdot I^2. \quad (1.4)$$

Полученное уравнение называется законом Ленца — Джоуля в интегральной форме и определяет количество теплоты, выделяющейся в проводнике при протекании электрического тока.



**Диэлектрики** — это материалы, не проводящие электрический ток проводимости, т. е. изоляторы. В отличие от проводников, в диэлектриках нет свободных электрических зарядов. Они состоят из нейтральных атомов или молекул. Заряженные частицы в нейтральном атоме связаны друг с другом и не могут перемещаться под действием электрического поля по всему объему диэлектрика.

При внесении диэлектрика во внешнее электрическое поле в нем возникает некоторое перераспределение зарядов, входящих в состав атомов или молекул. В результате такого перераспределения на поверхности диэлектрического материала появляются избыточные нескомпенсированные связанные заряды. Все заряженные частицы, образующие макроскопические связанные заряды, по-прежнему входят в состав своих атомов.

Связанные заряды создают электрическое поле, которое внутри диэлектрика направлено противоположно вектору напряженности внешнего поля. Этот процесс называется поляризацией диэлектрика. В результате полное электрическое поле внутри диэлектрика оказывается по модулю меньше внешнего поля. Чем сильнее поляризуется диэлектрик, тем больше ослабляются в нем поле электрического заряда и диэлектрическая проницаемость данного вещества.

Относительная диэлектрическая проницаемость равна

$$\epsilon = \frac{E_0}{E}, \quad (1.5)$$

где  $E_0$ ,  $E$  — напряженность электрического поля в свободном пространстве и в диэлектрике, В/м.

Поляризация твердых и жидких диэлектриков может значительно ослаблять поле электрических зарядов, т. е. диэлектрическая проницаемость может быть много больше единицы.

В диэлектриках электрическая энергия в тепловую преобразуется иначе. Для того чтобы разобраться в этом преобразовании, рассмотрим электромагнитные процессы в плоском конденсаторе, подключенном к зажимам генератора переменного тока. Пусть разность потенциалов или напряжение между обкладками изменяется во времени  $t$  по гармоническому закону с угловой частотой  $\omega$  и пространство между обкладками заполнено веществом с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ .

Под влиянием переменного электрического поля в диэлектрике поляризация происходит то в одном направлении, то в другом. Это непрерывное смещение заряженных частиц представляет собой электрический ток, называемый током смещения, который не совпадает по фазе с напряжением, прикладываемым к диэлектрическому образцу. При поляризации некоторых видов, например электронной, заряженные частицы диэлектрика под действием электрического поля смещаются без всякого запаздывания. При этом наибольшее смещение наблюдается тогда, когда напряжение проходит через нулевое значение, поскольку в этот момент поляризация происходит более интенсивно. Таким образом, ток смещения в диэлектрике опережает напряжение на четверть периода, или на  $90^\circ$  (рис. 1.2а), и поляризация не сопровождается затратой энергии:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi = 0. \quad (1.6)$$

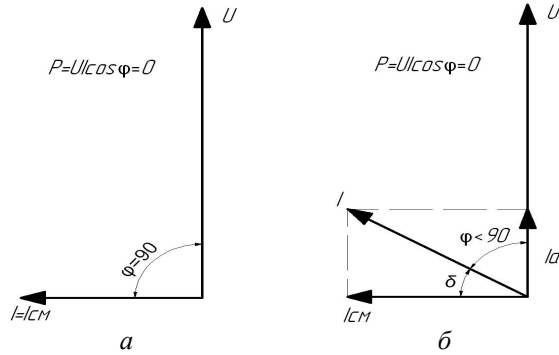


Рис. 1.2

Векторные диаграммы для диэлектриков с электронной (а) и дипольной поляризацией (б)

При дипольной поляризации других видов частицы диэлектрика смещаются с запаздыванием по отношению к напряжению, приложенному к диэлектрику, а ток смещения опережает вектор напряжения на угол  $\varphi < 90^\circ$  (рис. 1.2б). В полном токе появляется составляющая  $I_a$ , совпадающая по фазе с приложенным напряжением. Это явление обусловлено тем, что внутренние силы, действующие между частицами, препятствуют их ориентации в направлении электрического поля. На их преодоление требуется затрачивать электрическую энергию, которая выделяется в виде теплоты в диэлектрике:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi. \quad (1.7)$$

Угол  $\delta$ , называемый углом потерь диэлектриков, дополняет угол  $\varphi$  до  $90^\circ$  и характеризует поглощенную электрическую энергию, обращаемую в теплоту. Тогда выражение (1.7) можно записать в виде

$$P = U \cdot I \cdot \sin \delta. \quad (1.8)$$

Токи смещения  $I_{cm}$  и полный  $I$  связаны соотношением

$$I = \frac{I_{cm}}{\cos \delta}. \quad (1.9)$$

Ток смещения:

$$I_{cm} = U \cdot \omega \cdot C, \quad (1.10)$$

где  $\omega$  — угловая частота,  $1/c$ ;  $C$  — емкость конденсатора, Ф.

Емкость рабочего конденсатора:

$$C = \frac{S \cdot \varepsilon}{d}, \quad (1.11)$$

где  $S$  — площадь пластин конденсатора,  $m^2$ ;  $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость материала, Ф/м;  $d$  — расстояние между пластинами, м.

Диэлектрическая проницаемость материала, размещенного между пластинами конденсатора:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r, \quad (1.12)$$

где  $\varepsilon_0$  — диэлектрическая постоянная, Ф/м ( $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м);  $\varepsilon_r$  — относительная диэлектрическая проницаемость материала.

С учетом того, что  $\omega = 2\pi f$ , а также формул (1.9) и (1.10) выражение (1.8) можно записать как:

$$P = \frac{2\pi \cdot f \cdot U^2 \cdot \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot S \cdot \operatorname{tg} \delta}{d} \quad (1.13)$$

или

$$P = 2\pi \cdot f \cdot E^2 \cdot \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot V \cdot \operatorname{tg} \delta, \quad (1.14)$$

где  $E = U/d$  — напряженность электрического поля в диэлектрике, В/м;  $V = S \cdot d$  — объем диэлектрика, м<sup>3</sup>.

Если мощность отнести к единице объема материала, то равенство (1.14) можно переписать:

$$P_V = 2\pi \cdot f \cdot E^2 \cdot \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \operatorname{tg} \delta. \quad (1.15)$$

Выражение (2.15) связывает количество выделяющейся теплоты за единицу времени в единице объема диэлектрика, параметры электрического поля ( $f$  и  $E$ ) и материала ( $\varepsilon_r$  и  $\operatorname{tg} \delta$ ). Чтобы повысить удельную мощность, применяют высокие частоты и большие напряженности электрического поля, предельные значения которых ограничиваются пробоем (разрушением) диэлектрика.

**Полупроводники** — вещества, занимающие среднее положение между диэлектриками с электронной проводимостью и диэлектриками как по значению удельного сопротивления, так и по характеру действия их ионов на электроны, движение которых под действием внешнего электрического поля создает электрический ток.

В полупроводниках электроны связаны с ионами вещества достаточно сильно, но все же слабее, чем в диэлектриках. Поэтому тепловое движение нарушает связь части электронов с ионами и эти электроны становятся свободными, т. е. под влиянием электрического поля они способны создавать электрический ток. Чем интенсивнее тепловое движение (чем выше температура полупроводника), тем большее число электронов теряет свою связь с ионами и участвует в образовании электрического тока. При этом сопротивление полупроводника уменьшается. В полупроводниках наряду с электронной проводимостью имеется и дырочная. Преобладание проводимости того или другого типа зависит от наличия в проводниках различных примесей.

В полупроводнике, помещенном в электрическое поле, наряду с током смещения возникает и ток проводимости, который совпадает по фазе с напряжением и, следовательно, вызывает дополнительные затраты энергии электрического поля, преобразующиеся в теплоту. Векторная диаграмма в этом случае подобна диаграмме для диэлектрика, но угол  $\delta$  имеет большее значение, а следовательно, активная составляющая тоже больше.

### 1.3. Закономерности преобразования электрической энергии в тепловую

При электрическом нагреве в материале создаётся электрическое поле. Способы его образования могут быть различными.

Электрическое поле в проводнике создаётся при непосредственном его подключении к источнику ЭДС. Под действием поля свободные заряды (ионы, электроны) начинают перемещаться, приобретая кинетическую энергию. Сталкиваясь с нейтральными атомами и молекулами, они отдают запасённую кинетическую энергию, которая расходуется на увеличение теплового движения частиц, и температура вещества повышается.

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

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

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 за счёт работы, либо теплообмена.

Преобразование электрической энергии в тепловую происходит за счёт работы (энергии) электромагнитного поля.

Существуют два вида преобразования электрической энергии в тепловую — прямое и косвенное.

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

**Косвенное преобразование** состоит в том, что электрическая энергия в тепловую энергию не превращается непосредственно в нагреваемой среде (или веществе), а выделяется в специальных элементах (в электропечах сопротивления, нагревательных элементах, в установках индукционного нагрева при нагреве жидкости и газа — корпусе и оболочке, при дуговом нагреве — электрической дуге и т. д.) и передается от нагревателей среде (или веществу): конвекцией (электропечи сопротивлением косвенного действия, установки индукционного нагрева газов и жидкостей), излучением (вакуумные и высокотемпературные газонаполненные электропечи сопротивления) или теплопроводностью (электронагреватели и др.).

## 1.4. Терминология и определения в электротермии

В электротермии, как и в любой другой прикладной науке, имеется определённая, узаконенная соответствующими стандартами (ГОСТ 22622-77, ГОСТ 16382-87, 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.

**Прямой электронагрев** — процесс, при котором тепло выделяется в нагрузку, включенной в электрическую цепь.

**Косвенный электронагрев** — процесс, при котором тепло выделяется в нагревателе и передаётся нагрузке теплообменом.

**Дуговой нагрев** — электронагрев нагрузки электрической дугой.

**Индукционный нагрев** — электронагрев электропроводящей нагрузки электрическими токами, которые индуцируются переменным магнитным полем.

**Инфракрасный нагрев** — электронагрев инфракрасным излучением при условии, что излучательные спектральные характеристики излучателя соответствуют поглощательным характеристикам нагреваемой нагрузки.

**Диэлектрический нагрев** — электронагрев неэлектропроводящей нагрузки токами смещения при поляризации.

**Нагрев сопротивлением** — электронагрев за счёт электрического сопротивления электронагревателя или нагрузки.

**Нагрев токами сверхвысокой частоты** — электронагрев, 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** — электронагрев нагрузки стабилизированным высокотемпературным ионизированным газом, образующим плазму.

**Электронно-лучевой нагрев** — электронагрев нагрузки сфокусированным электронным лучом в вакууме.

**Лазерный нагрев** — электронагрев за счёт последовательного преобразования электрической энергии в энергию лазерного излучения и затем в тепловую в облучаемой нагрузке.

**Ионный нагрев** — электронагрев нагрузки потоком ионов, образованным электрическим разрядом в вакууме.

**Электротермическое оборудование (ЭТО)** — комплекс технологического оборудования и устройств для осуществления электротермического процесса.

**Электротермическая установка (ЭТУ)** — совокупность электротермического и другого технологического оборудования вместе с сооружениями и коммуникациями, обеспечивающими проведение электротермического процесса.

**Электрокалорифер** — электротермическое устройство, в котором воздух или газ нагреваются при движении через рабочее пространство, внутри которого расположен электронагреватель.

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

**Камера для нагрева** — конструктивный элемент электропечи (электротермической установки), ограничивающий пространство, в котором осуществляется электротермический процесс.

**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** — электрический проводник, имеющий электронную проводимость и находящийся в контакте с ионным проводником — электролитом (ионной жидкостью, твердым электролитом), ионизированным газом.

## 1.5. Классификация электротермических установок

Электротермические установки классифицируют по следующим признакам: по способу превращения электрической энергии в тепловую и другим признакам; роду тока; частоте тока; способам теплопередачи; технологическому назначению; по напряжению питания; рабочей температуре.

Классификация ЭТУ по способу преобразования электрической энергии в тепловую (рис. 1.3):

- 1) нагрев сопротивлением прямой (рис. 1.3а) и косвенный (рис. 1.3б);
- 2) нагрев электрической дугой (рис. 1.3в);
- 3) нагрев в переменном магнитном поле — индукционный способ (рис. 1.3г);
- 4) нагрев в переменном электрическом поле — диэлектрический способ (рис. 1.3д);
- 5) нагрев электронным пучком (рис. 1.3е);
- 6) нагрев квантами (лазерный) (рис. 1.3ж);
- 7) плазменный нагрев (рис. 1.3з);
- 8) термоэлектрический нагрев.

В сельском хозяйстве наиболее распространён электрический нагрев методом сопротивления, физическая сущность которого заключается в том, что при прохождении электрического тока по проводнику в нем выделяется теплота, в соответствии с законом Ленца — Джоуля:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot \tau, \quad (1.16)$$

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)