

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра электроснабжения



**ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ  
ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ**

Методические указания к практическим занятиям по  
дисциплине «Высоковольтные электротехнологические процессы и  
аппараты» для студентов и магистров электротехнических  
направлений подготовки и специальностей  
всех форм обучения

Курск 2016

УДК 621.3.031

Составитель Н.М. Гайдаш

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент *Ю.А. Артеменко*

**Высоковольтные электротехнологические процессы и аппараты:** методические указания к практическим занятиям по дисциплине «Высоковольтные электротехнологические процессы и аппараты» для студентов и магистров электротехнических направлений подготовки и специальностей всех форм обучения / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: Н.М. Гайдаш. - Курск, 2016. 38 с.: ил. 3. - Библиогр.: с. 37.

Содержат рекомендации для подготовки к практическим занятиям по расчету электрических параметров различных электротехнологических процессов и установок, их устройству, принципу работы и области применения.

Могут быть использованы при подготовке к зачету по дисциплине «Высоковольтные электротехнологические процессы и аппараты».

Предназначены для студентов и магистров электротехнических направлений подготовки и специальностей.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать                      Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.  
Усл. печ. л.                      . Уч.-изд.л.                      . Тираж 30 экз. Заказ                      . Бесплатно.  
Юго-Западный государственный университет.  
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94

**Практическое занятие 1**

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО НАГРЕВА

Цель занятия: закрепить знания по применению электронно-лучевого нагрева в различных технологических процессах

### Общие положения

Технологические процессы с электронным нагревом материала

В технологических процессах нагрева электронным лучом обеспечиваются плотности мощности  $q = 10^4 \div 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>. При этом нагрев без плавления обычно осуществляют при  $q = 10^4$  Вт/см<sup>2</sup> плавление – при  $q = 10^4 \div 10^6$  Вт/см<sup>2</sup> испарение – при  $q = 10^6 \div 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>.

Выбор конкретного значения плотности мощности определяется физическими характеристиками материала и видом обработки. Например, используя электронный поток с  $q = 10^4$  Вт/см<sup>2</sup> для плавления металла, нужно иметь в виду, что на плавлении расходуется ~ 35 % энергии луча; 60 % ее отводится в объем металла и 5 % уносится с испаряемыми частицами.

Обработку можно вести как несфокусированным, так и сфокусированным лучевым электронным потоком.

### Обработка несфокусированным пучком

Нагрев несфокусированными потоками электронов используется в основном для обезгаживания материала деталей (удаление газа, примесей газа с поверхности или из толщи), рекристаллизации плеточных композиций перед мехобработкой или диффузионной сваркой.

Нагрев электронной бомбардировкой осуществляется при ускоряющем напряжении до 10 кВ.

Переплав материалов используется в технологии особо чистых материалов. Металлы в результате вакуумного переплава очищаются от примесей, в них снижается концентрация растворённых газов при этом пластичность повышается.

В установках с несколькими пушками можно переплавлять несколько металлов одновременно, получая сплав требуемого состава.

Электронная плавка используется для выращивания монокристаллов по методу Чохральского: из расплава с определённой температурой, поддерживаемой бомбардировкой электронами, вверх с помощью предварительно ориентированной заправки вытягивают монокристаллический слиток.

Электронно-лучевая обработка сфокусированным электронным

## лучом

Сварка электронным пучком занимает 5% от всех видов сварки в плавлении в мире. Процесс ведут при низком ускоряющем напряжении – до 30 кВ, среднем – до 60-80 кВ и высоком – до 200 кВ. Электронный пучок на поверхности стыка материалов фокусируют в пятно  $\varnothing$  от 0.1 мм до нескольких мм, что при мощности сварочных пушек 1-100 кВт позволяет достигать плотностей мощности  $q = 10^5 \div 10^7$  Вт/см<sup>2</sup>.

Изменяя параметры процесса, можно получать различные соотношения глубины  $h$  проплавления к ширине  $d$  шва. Можно получить так называемые «кинжальное» проплавление – когда  $h \gg d$ . Этот режим характеризуется (достигается) большим  $U_{\gamma} \approx 100-200$  кВ и плотностями мощности  $q = 10^7 \div 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>. КПД ЭЛУ для сварки  $\sim 90$  %. Количество ЭЛС установок в мире  $> 10000$ .

### Размерная обработка

Производится с помощью остросфокусированных потоков электронов с плотностями мощности  $q \geq 5 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>. Она основана на интенсивном испарении материалов из зоны воздействия пучка с минимальным образованием эскизной фазы. Этот вид обработки используется для подгонки электрических номиналов элементов тонкоплёночных 10-100 нм схем, обработки изделий из кремния, германия, керамики и т.д.

Мощность установок не превышает 1 кВт в непрерывном (режиме) и 15 кВт в импульсном.

При больших плотностях мощности и  $U_{\gamma} \approx 100-175$  кВ в зоне обработке возникают высокие температуры. Все известные материалы при таких условиях плавятся и затем напрягаются или же сублимируются.

Сублимация – переход вещества из твёрдого состояния в газообразное без пребывания в жидком состоянии.

Напыление плёнок электронно-лучевым испарением материала.

Процесса приводится в вакууме ( $10^{-2}$  Па), а испарение материала происходит из расплава, находящегося обычно в водоохлаждаемом тигле. Пленки характеризуются малым содержанием нежелательных примесей. Высокая температура напыляемой поверхности, поддерживаемая разогревом (прямым) электронной бомбардировкой, стимулирует процессы термического разложения загрязнений и глубокое обезгаживания материала.

## Практическое занятие 2

### ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ СХЕМ УСТАНОВОК ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО НАГРЕВА

Цель занятия: закрепить полученные знания по основным конструктивным схемам установок ЭЛН

#### Общие положения

#### Конструкции электронно-лучевых установок (ЭЛУ)

Во всех ЭЛУ имеются общие системы, сходные по своему функциональному назначению и принципу действия. Среди них можно выделить два комплекса – энергетический и электромеханический.

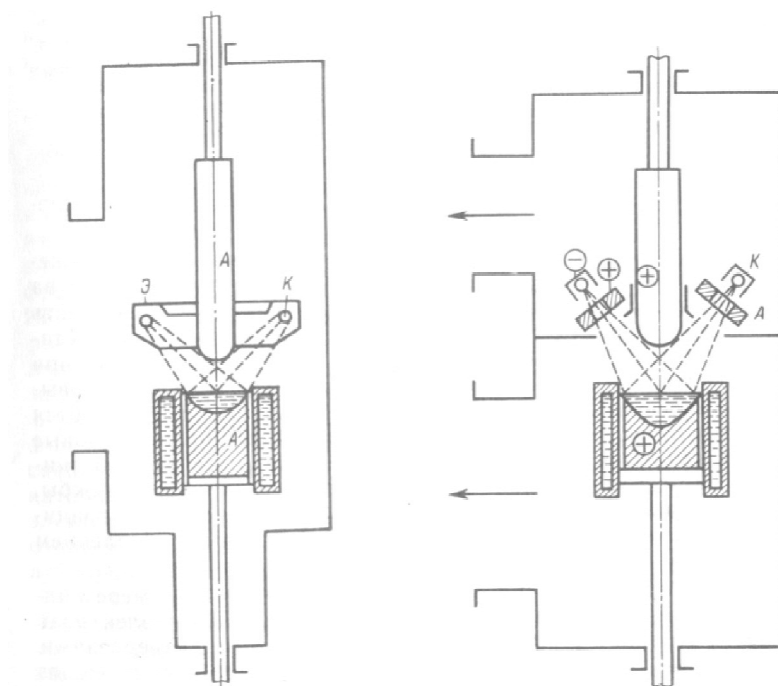


Рисунок 1 Схема ЭЛУ с кольцевым катодом, схема ЭЛУ с радиальными пушками

Энергетический комплекс ЭЛУ включает в себя электронную пушку с блоками питания и управления лучом. Электронной пушкой называется устройство, в котором эмиттируемый катодом пучок электронов формируется в электрическом и магнитном полях в луч, который ускоряется в электрическом поле, выводится через отверстие в аноде и направляется на нагреваемый объект.

Многочисленным семейством ЭЛУ являются плавильные установки. Наиболее простая схема электронной плавильной установки с кольцевым катодом и автоэлектронным нагревом, у которой анодом служит сам расплавляемый металл, показана на рис.

1. Катодом  $K$  является нагретая до  $2500\text{ K}$  протекающим через нее током вольфрамовая спираль. Анод  $A$  – расплавляемый электрод и жидкометаллическая ванна, находящаяся в верхней части образующегося в кристаллизаторе слитка. Вокруг катода расположен молибденовый экран  $\mathcal{E}$ , находящийся под тем же потенциалом. Выходящие из катода электроны отталкиваются экраном и в виде кольцевого пучка устремляются на электрод и в жидкометаллическую ванну слитка. Конец электрода расплавляется под действием бомбардирующих его электронов. Жидкий металл каплями стекает в ванну.

Поднимая и опуская электрод, можно изменять количество попадающих на него электронов. Можно приподнять его так, чтобы прекратить его плавление, в этом случае металл в ванне будет перегреваться или выдерживаться при постоянной температуре.

*ЭЛУ с кольцевым катодом* работают на ускоряющем напряжении  $5\text{--}15\text{ кВ}$ . Их преимуществами являются простота устройства и высокая проводимость, вследствие чего в них можно получить значительные токи пучка при низком напряжении. Их недостаток – нахождение катода в плавильной камере, из-за чего при газовой выделении с поверхности ванны он оказывается в зоне повышенного давления. Вышедшие из катода электроны сталкиваются с частицами газов и ионизируют их. Образующиеся положительные ионы направляются к катоду и оседают на нем, что сильно снижает его эмиссионную способность и сокращает срок службы. Поэтому плавильные ЭЛУ с кольцевым катодом имеют ограниченное применение для переплава металлов с малым выделением газов.

*ЭЛУ с радиальными пушками* (рис. 2) в меньшей мере подвержены этому недостатку. В этих установках вокруг электрода по радиусу установлено несколько катодов и анодов с отверстиями, через которые движущиеся прямолинейно электроны проходят к концу электрода и к ванне. Таким образом, здесь анод отделен от расплавляемого металла, хотя и тот и другой находятся под одинаковым потенциалом. Анод является направляющим и формирующим устройством. В данном случае система анод–катод соответствует понятию электронной пушки.

Часть установки, в которой находятся электронные пушки, отделена от плавильного пространства перегородкой с отверстиями для электрода и пучка электронов. Верхняя и нижняя части

камеры имеют индивидуальные системы откачки газов. При значительном выделении газов из ванны лишь часть паров металла попадает через отверстия в верхнюю камеру и откачивается из нее насосом. Радиальные пушки работают при относительно низком ускоряющем напряжении (около 35 кВ), поэтому они имеют ограниченную мощность. Для увеличения мощности всей ЭЛУ необходимо увеличить количество радиальных пушек.

В качестве плавильных наибольшее распространение получили ЭЛУ с аксиальными пушками (рис. 3). В отличие от радиальной аксиальная пушка образует сильно сфокусированный электронный луч. В ней имеются два катода. Основной катод  $K$  выполнен в виде массивной вогнутой снизу вольфрамовой пластины и разогревается до 2300–2500 К электронной бомбардировкой от вспомогательного катода  $K_1$ , который выполнен в виде нагреваемой током вольфрамовой спирали. Между катодами прикладывается напряжение 3,5–5,0 кВ. Вспомогательный катод имеет отрицательный потенциал относительно основного, так что основной катод является анодом для вспомогательного. Анод  $A$  имеет специальную форму для создания в пространстве между ним и катодом такого электрического поля, которое сфокусировало бы электронный пучок так, чтобы он практически весь проходил через отверстие анода. Пройдя через анод, электронный луч попадает в лучепровод  $L$ , соединяющий катодную камеру с плавильной камерой установки, в которой находится переплавляемый электрод  $\mathcal{E}$ . Он может перемещаться горизонтально: его можно вводить под пучок или выводить из-под него. Часть электронов луча проходит мимо электрода и попадает на поверхность ванны жидкого металла, расположенной в кристаллизаторе в нижней части камеры.

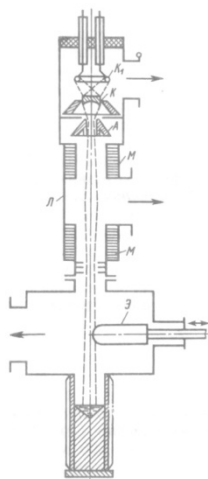


Рисунок 3 Схема ЭЛУ с аксиальной пушкой

Лучепровод должен защищать катодный узел от прорыва в него газов из плавильной камеры. С этой целью лучепровод снабжается откачивающим насосом, кроме того, имеются насосы, откачивающие газы и пары из катодного узла и рабочей камеры. В луче-проводе производится дополнительная магнитная фокусировка с помощью магнитных линз  $M$ , поскольку на своем пути через лучепровод электронный пучок расширяется. ЭЛУ с аксиальными пушками работают при ускоряющем напряжении 30–40 кВ.

*Плавильные ЭЛУ* применяются главным образом для переплавки стали, молибдена, ниобия и других тугоплавких и химически активных металлов. Их мощность составляет от 50 (в лабораторных условиях) до 2000 кВт.

*Сварочные ЭЛУ* с особо остросфокусированным лучом работают при ускоряющем напряжении 70–100 кВ.

Для питания ЭЛУ используются высоковольтные источники питания постоянного тока. Они состоят из повышающих трансформаторов и высоковольтных выпрямителей, собираемых на тиратронах, селеновых элементах или кремниевых диодах. На крупных установках для стабилизации тока пучка применяются параметрические источники тока.

Катод является одним из основных узлов электронной пушки. Для них катоды изготавливают из тугоплавких металлов (W, Ta, Mo), оксидов редкоземельных металлов (Zr, La), а также интерметаллических соединений, например гексаборида лантана. Металлические катоды прямого нагрева применяются при небольших токах эмиссии (до 20 мА), а косвенного нагрева – при больших токах (100–200 мА). Заданная сходимость электронного луча обеспечивается подбором конфигурации катодного электрода и анода. После прохождения анода электроны движутся в пространстве, в котором отсутствует электрическое поле. Поскольку электронный луч обладает объемным пространственным зарядом, вследствие столкновения электронов происходит расфокусировка луча. Поэтому после электростатической фокусировки луч фокусируется также электромагнитной линзой, которая представляет собой катушку в магнитопроводе, питающуюся от выпрямителя, обеспечивающего стабильное напряжение и минимальную пульсацию

Из всех видов электрических печей ЭЛУ являются наиболее сложным комплексом электротехнического оборудования.



В системах электроснабжения ЭЛУ выделяются основные и вспомогательные цепи. К основным относятся цепи накала катода, питания преобразователя постоянного тока, а также цепи питания, получения, измерения и контроля вакуума; к вспомогательным – цепи фокусировки, отклонения и развертки электронного луча.

Системы питания ЭЛУ и обеспечения вакуума должны работать надежно и стабильно, поскольку от этого зависит качество переплавляемого материала.

В состав электромеханического комплекса входят рабочая камера, вакуумная система, системы позиционирования и перемещения заготовки, система наблюдения за ходом процесса, система защиты оператора от рентгеновского излучения и ряд вспомогательных устройств и механизмов.

*Вакуумная камера* как базовый элемент ЭЛУ определяется видом осуществляемого технологического процесса и является одним из наиболее важных и сложных узлов электромеханического комплекса. Камера должна быть герметичной, механически прочной и жесткой. Материал камеры должен поглощать рентгеновское излучение.

Основная функция вакуумной системы – создание и поддержание в рабочем объеме и в электронной пушке необходимого вакуума, поскольку давление в зоне взаимодействия электронного луча с обрабатываемым изделием должно составлять  $10^{-1} - 10^{-4}$  Па.

Конструкция систем *позиционирования и перемещения заготовок* определяется видом операции. Наиболее просты устройства, применяемые при электронно-лучевой плавке (вытягивание слитка). Самые сложные системы используются при размерной обработке – они обеспечивают 5–6 видов различных перемещений с погрешностью позиционирования 1–5 мкм.

### Практическое занятие 3

## РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ИНДУКЦИОННОЙ ТИГЕЛЬНОЙ ПЕЧИ

Цель занятия: изучить метод расчета мощности индукционной тигельной печи.

Перед изучением данной темы необходимо повторить по учебной литературе принцип действия, конструкцию и область применения основных установок индукционного нагрева, а также физико-химические, механические, технологические и эксплуатационные свойства металлов, сплавов и диэлектрических материалов.

Необходимо выписать и усвоить основные законы постоянного тока: Ома, Кирхгофа, Джоуля-Ленца и другие.

Для проведения электрического расчета ИТП в качестве исходных данных необходимо знать:

- наименование расплавляемого металла или марку сплава и его состав;
- конфигурацию и характерные размеры кусков шихты;
- исходную температуру загружаемой шихты, для ферромагнитных материалов – температуру точки Кюри, температуру плавления и температуру разливки;
- удельные электросопротивления шихты для вышеуказанных температур;
- теплосодержание или энтальпию, теплоемкость и скрытую теплоту плавления металла или сплава для вышеуказанных температур;
- емкость тигля;
- производительность печи;
- длительность процесса плавки;
- длительность вспомогательных операций;
- параметры питающей сети.

#### 1.1. Расчет мощности индукционной тигельной печи

Полезная мощность ИТП определяется по формуле:

$$P_{\text{пол}} = qG/(3,6T_{\text{пл}}), \text{ Вт} \quad (1.1)$$

где  $q$  – теплосодержание расплавляемого металла или сплава при температуре разливки, Дж/кг;

$G$  – емкость печи, т  
 $t_{пл}$  – время плавки, ч.

Если известна энтальпия металла или сплава при температуре разливки, то полезная мощность ИТП определяется по выражению:

$$P_{пол} = c_p G / (t_{пл}), \text{ кВт} \quad (1.2)$$

где  $c_p$  – энтальпия расплавляемого металла или сплава при температуре разливки, кВт·ч/кг;

$G$  – емкость печи, кг  
 $t_{пл}$  – время плавки, ч.

Суммарные тепловые потери  $\Delta P_m$  составляют 5–35% полезной мощности печи  $P_{пол}$ , причем меньшая цифра относится к печам большей емкости. Термический КПД ( $\eta_m$ ) индукционной тигельной печи составляет 75-95% и определяется по выражению:

$$\eta_m = P_{пол} / (P_{пол} + \Delta P_m). \quad (1.3)$$

Активная мощность  $P_2$ , передаваемая в загрузку (садку) ИТП определяется по выражению

$$P_2 = P_{пол} + \Delta P_m, \text{ Вт}. \quad (1.4)$$

Активная мощность  $P_n$  ИТП ориентировочно определяется по выражению:

$$P_n = P_2 / \eta_\partial, \text{ Вт}, \quad (1.5)$$

где  $\eta_\partial$  – электрический КПД индуктора ИТП. Значение  $\eta_\partial$  может составлять 70-95%. Это значение тем выше, чем больше удельное сопротивление расплавляемого металла. По данным /6/, при плавке алюминия  $\eta_\partial = 0,5 - 0,6$ , при плавке чугуна и стали  $\eta_\partial = 0,7 - 0,85$

Мощность источника питания  $P_{ист}$  должна быть немного больше (на 5 – 10%) активной мощности  $P_n$ . Это связано с тем, что источник питания должен покрывать потери  $\Delta P_{м.к}$  в токоподводе и в конденсаторах.

Мощность источника питания определяется выражением

$$P_{ист} = P_n + \Delta P_{м.к}. \quad (1.6)$$

После определения ориентировочной мощности печи и выбора частоты тока следует подбор источника питания.

### Пример 1

Рассчитать мощность источника питания индукционной тигельной печи емкостью  $G = 6$  т.

Печь предназначена для плавки стали, имеющей следующие характеристики:

- температура разливки  $t_k = 1600^\circ\text{C}$ ;
- плотность при температуре разливки  $\gamma = 7200 \text{ кг/м}^3$ ;
- теплосодержание при температуре разливки  $q = 1,42 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$  /7/;
- энтальпия при температуре разливки  $c_p = 0,385 \text{ кВт}\cdot\text{ч/кг}$  /6/;
- удельное сопротивление стали в холодном состоянии  $\rho_x = 0,2 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ;
- удельное сопротивление стали при температуре потери магнитных свойств  $\rho_{ш} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ;
- удельное сопротивление стали перед сплавлением кусков шихты  $\rho'_{ш} = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ;
- удельное сопротивление стали при температуре разливки  $\rho_2 = 1,37 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ;

Плавка стали производится без рафинирования, режим работы – на твердой завалке. Время плавки  $t_{пл} = 1,5$  ч. Средний диаметр кусков шихты  $d_{ш} = 0,08$  м.

1. Определим полезную мощность ИТП по формуле (1.1)

$$P_{пол} = qG/(3,6t_{пл}) = 1,42 \cdot 10^6 \cdot 6 / (3,6 \cdot 1,5) = 1577777,8 \text{ Вт.}$$

2. Определим полезную мощность по формуле (1.2)

$$P_{пол} = c_p G / (t_{пл}) = 0,385 \cdot 6 \cdot 10^3 / 1,5 = 1540 \text{ кВт.}$$

Для последующих расчетов принимаем  $P_{пол} = 1600$  кВт, тепловые потери  $\Delta P_m = 110$  кВт (6,88 % от полезной мощности).

3. Далее необходимо определить активную мощность  $P_2$ , передаваемую в загрузку(шихту) по формуле (1.4)

$$P_2 = P_{пол} + \Delta P_m = 1600 + 110 = 1710 \text{ кВт.}$$

4. Определим термический КПД ИТП по формуле (1.3)

$$\eta_m = P_{\text{пол}} / (P_{\text{пол}} + \Delta P_m) = 1600 / 1710 = 0,936.$$

5. Принимаем электрический КПД  $\eta_{\text{э}} = 0,85$  и рассчитываем активную мощность печи по формуле (1.5)

$$P_n = P_2 / \eta_{\text{э}} = 1710 / 0,85 = 2011,8 \text{ кВт.}$$

6. Определим мощность источника питания с учетом потерь в токоподводе и в конденсаторной батарее по формуле (1.6)

Принимаем мощность потерь 9% от активной мощности печи  $\Delta P_{m.k} = 0,09 \cdot 2011,8 = 181,1 \text{ кВт}$

$$P_{\text{ист}} = P_n + \Delta P_{m.k} = 2011,8 + 181,1 = 2192,9 \text{ кВт.}$$

## Практическое занятие 4

# РАСЧЕТ ЧАСТОТЫ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ И ВЫБОР ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ИНДУКЦИОННОЙ ТИГЕЛЬНОЙ ПЕЧИ

Цель занятия: Расчет частоты индукционных тигельных печей.

Расчет частоты индукционных тигельных печей производится исходя из выражения для определения глубины проникновения тока в загрузку(шихту)

$$\Delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu_0\mu_r 2\pi f}}, \text{ М,} \quad (1.7)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление загрузки,

$\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость загрузки,

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная проницаемость вакуума,

$f$  - частота питающей сети, Гц.

Из формулы (1.7) частота ИТП в общем виде равна

$$f = 0,2533 \frac{\rho \cdot 10^6}{\mu_r \cdot \Delta^2}, \text{ Гц} \quad (1.8)$$

Выражение для  $f_{min}$  зависит от значения некоторого характерного размера (аргумента)

$$m_2 = \frac{d_{ш}}{\sqrt{2} \cdot \Delta_{ш}},$$

где  $d_{ш}$  – средний диаметр кусков шихты, м

$\Delta_{ш}$  – глубина проникновения тока в шихту, м.

Заменив в формуле (1.8)  $\Delta$  на  $\Delta_{ш}$  и выразив  $\Delta_{ш}$  через  $m_2$ , определим  $f_{min}$ .

Следует помнить, что при нагреве стали изменяются ее удельное сопротивление и магнитная проницаемость.

Магнитная проницаемость слабо зависит от температуры примерно до 650 – 700°C, после чего быстро уменьшается и достигает значения, примерно равного проницаемости вакуума. В приближенных расчетах считают, что она падает скачком до  $\mu=1$  в точке магнитных превращений (точке Кюри), соответствующей температуре 750-770 °С.

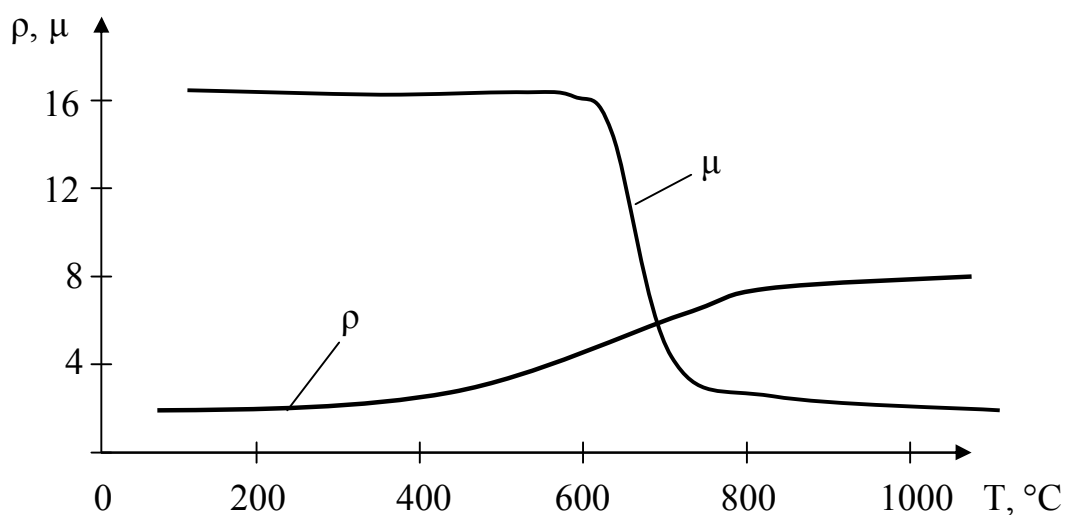


Рисунок 4 Зависимость относительной магнитной проницаемости и удельного сопротивления от температуры для среднеуглеродистой стали

На рисунке 4 исходное значение магнитной проницаемости принято равным 16, что объясняется применением при индукционном нагреве сильных магнитных полей. Часто ее исходное значение составляет 5-6.

Зависимость удельного сопротивления от температуры для стали с содержанием углерода 0,4-0,5 % приведена также на рисунке 4. Из кривой видно, что в интервале от 15 до 800°C удельное сопротивление возрастает примерно в 5 раз. Далее рост удельного сопротивления замедляется, причем значения его для разных марок стали становятся примерно равными.

В среднем принимаем в интервале температур 800-900°C удельное сопротивление равным  $10^{-6}$  Ом·м. В результате падения магнитной проницаемости и роста удельного сопротивления в процессе нагрева глубина проникновения тока возрастает в 8-10 раз.

Для определения глубины проникновения тока в сталь, нагретую выше точки магнитных превращений, запишем формулу

$$\Delta_k \approx 0,5/\sqrt{f} \quad \text{при } \rho = \rho_k = 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м и } \mu=1.$$

Индекс «к» указывает, что значения соответствующих величин относятся к температуре, превышающей точку магнитных превращений (т. Кюри). Глубину проникновения тока в этом случае будем называть горячей глубиной проникновения тока.

Изменение удельного сопротивления для чистых металлов

можно посмотреть в /1/.

По рекомендациям /2/ минимальная частота печи с кусковой шихтой определяется по формуле

$$f_{min} \geq 4,54 \cdot 10^6 \frac{\rho_{ш}}{d_{ш}^2}, \text{ Гц при условии } d_{ш} / \sqrt{2} \cdot \Delta_{ш} \geq 3 \quad (1.9)$$

где  $\rho_{ш}$  – удельное сопротивление шихты при температуре потери магнитных свойств.

Определив  $f_{min}$ , произведем выбор частоты, исходя из шкалы частот источников питания электротермических установок: 50, 500, 1000, 2400, 4000, 8000, 10000 Гц.

### Пример 2

Рассчитать частоту источника питания и выбрать источник питания индукционной тигельной печи.

Исходные данные:

Печь предназначена для плавки стали, имеющей следующие характеристики:

- температура разливки  $t_k = 1600^\circ\text{C}$ ;
- плотность при температуре разливки  $\gamma = 7200 \text{ кг/м}^3$ ;
- теплосодержание при температуре разливки  $q = 1,42 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$  /7/;
- энтальпия при температуре разливки  $c_p = 0,385 \text{ кВт}\cdot\text{ч/кг}$  /6/;
- удельное сопротивление стали в холодном состоянии  $\rho_x = 0,2 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ;
- удельное сопротивление стали при температуре потери магнитных свойств  $\rho_{ш} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ;
- удельное сопротивление стали перед сплавлением кусков шихты  $\rho'_{ш} = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ;
- удельное сопротивление стали при температуре разливки  $\rho_2 = 1,37 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ;

Плавка стали производится без рафинирования, режим работы – на твердой завалке. Время плавки  $t_{пл} = 1,5 \text{ ч}$ . Средний диаметр кусков шихты  $d_{ш} = 0,08 \text{ м}$ .

Определим минимальную частоту тока индукционной тигельной печи по формуле (1.9)

$$f_{min} \geq 4,54 \cdot 10^6 \frac{\rho_{ш}}{d_{ш}^2}$$



$$f_{min} \geq 4,54 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot 10^{-6} / 0,08^2 = 709 \text{ Гц}$$

Выбираем частоту 500 Гц .

В качестве источника питания принимаем три тиристорных преобразователя, включенные в параллель, суммарной мощностью 2400 кВт. Напряжение источника питания, подводимое к индуктору  $U_{и} = 1500 \text{ В}$ .

Характеристики выбранного источника питания соответствуют данным для индукционной тигельной печи ИСТ-6, предназначенной для плавки стали.

## Практическое занятие 5

# ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

Цель занятия: закрепить полученные знания по физическим основам электрогидравлического эффекта

### Общие положения

Физические основы электрогидравлического эффекта

Электрогидравлический эффект – это возникновение высокого давления в результате высоковольтного электрического разряда между погруженными в непроводящую жидкость электродами. За счет энергии импульсной ударной волны, распространяющейся вокруг канала разряда в рабочей среде, возникает давление до  $300 \text{ МН/м}^2$ .

По существу, электрический разряд в жидкости – это новый способ преобразования электрической энергии в механическую, которое совершается без промежуточных звеньев и с высоким КПД. Принципиальная схема осуществления электрогидравлического эффекта показана на рис. 5. Элементами схемы являются повышающий трансформатор  $Tr$ , выпрямитель  $D$ , накопитель энергии  $C$ , формирующий промежуток  $ФП$  и разрядный промежуток  $РП$ .

Искровой высоковольтный разряд в жидкости характеризуется очень быстрым преобразованием запасенной в накопителе электрической энергии в тепловую, световую, механическую и т. д.

При пробое практическая несжимаемость жидкостей приводит к появлению такого явления, как *электрогидравлический удар*, что еще больше усиливает действие электрического взрыва.

В образовании и развитии искрового канала в жидкости можно выделить следующие стадии.

1. При подаче высокого напряжения на разрядный промежуток в жидкости в течение некоторого времени  $\tau_1$  напряжение на нем остается постоянным или незначительно уменьшается. Затем в зависимости от параметров контура и начального напряжения оно довольно резко падает.

При высоких напряжениях на рабочих электродах механизм образования канала разряда обусловлен появлением лидеров. Они образуют потоки электронных лавин, срывающихся с отрицательного и устремляющихся к положительному электроду. В начальной стадии пробоя образуется несколько лидерных каналов, которые

затем сливаются в один общий канал.

Длительность промежутка времени  $\tau_1$  определяется свойством жидкости, напряжением, формой и размерами электродов. Чем выше напряжение, меньше длина рабочего промежутка и площадь положительного электрода, тем меньше  $\tau_1$ . Время  $\tau_1$  характеризует так называемую лидерную стадию разряда. На рис. 6 показаны зависимости тока, напряжения, мощности и сопротивления канала разряда от времени. Лидерная, или стриммерная, стадия длится от момента приложения напряжения к разрядному промежутку до момента завершения пробоя промежутка, т.е. до образования токопроводящего канала между электродами, и составляет около  $10^{-7}$  с.

2. Стадия яркой вспышки начинается после пробоя межэлектродного промежутка. Во время ее прохождения выделяется большая часть запасенной в накопителе энергии. Эта стадия характеризуется небольшим временем протекания и значительным световым излучением. После пробоя сопротивление межэлектродного промежутка падает на несколько порядков, ток при этом резко возрастает (максимум тока на несколько порядков превосходит токи лидерной стадии). Плотность тока в канале разряда достигает значений до  $10^6$  А/см<sup>2</sup> и выше. Плотность выделяющейся в канале энергии также очень велика, что приводит к разогреву окружающей среды, ее диссоциации и ионизации. В результате этого в канале разряда образуется плазма с температурой порядка 15–20 тыс К.

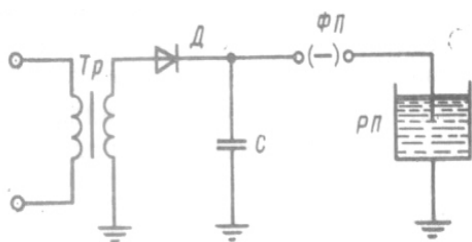


Рисунок 5 Электрическая схема установки электрогидравлической обработки

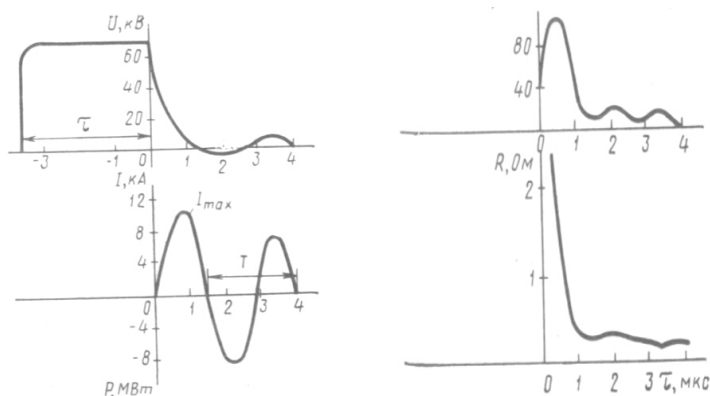


Рисунок 6 Зависимости тока, напряжения, мощности и сопротивления канала разряда от времени

Интенсивный нагрев плазмы разрядным током приводит к повышению давления в канале и его расширению. Во время быстрого расширения канала (скорость увеличения диаметра канала  $10^6$  см/с) в прилегающей жидкости возникает ударная волна, распространяющаяся от канала разряда в виде зоны сжатия с очень крутым передним фронтом. Фронт ударной волны, сначала неотделимый от стенки канала, спустя некоторое время отделяется от нее, поскольку скорость распространения ударной волны в среде гораздо выше скорости расширения канала разряда.

Когда ударная волна подходит к некоторой точке среды, давление, плотность и другие характеризующие среду параметры скачкообразно возрастает. По мере удаления фронта волны от канала скорость ее распространения приближается к звуковой, а давление на фронте волны падает в результате рассеивания энергии.

С уменьшением тока в разрядном контуре при достаточной мощности источника электрической энергии искровой разряд может перейти в стадию дугового. При этом уменьшается плотность тока в канале и температура плазмы в нем. При дуговом разряде ток поддерживается в основном за счет термоэлектронов катода. В канале происходит образование пара за счет превращения остывающей плазмы в пар и испарения некоторой части жидкости из окружающих канал разряда слоев. Канал разряда превращается в парогазовую сферу. По мере расширения сферы давление в ней понижается и становится меньше гидростатического. Окружающие газовую сферу слои воды при этом продолжают двигаться по инерции. После достижения максимального размера сфера начинает сжиматься. Таких циклов расширение – сжатие может быть несколько.

Начальная форма канала разряда, образовавшегося в ре-

зультате высоковольтного пробоя жидкости, определяется формой лидера, замыкающего электроды. Поэтому такой канал почти всегда искривлен. Возбуждение же разряда с помощью взрывающейся проволоочки образует канал, имеющий геометрически правильную форму в виде прямого цилиндра со сферическими торцами. Начальный диаметр канала при высоковольтном пробое воды составляет несколько десятых долей миллиметра. При возбуждении же разряда проволоочкой начальный диаметр канала разряда определяется диаметром проволоочки.

Материал взрывающихся проволоочек и их размеры существенно влияют на значение и характер выделяемой энергии при высоковольтном разряде в жидкости. Так, время от начала протекания тока до взрыва зависит от сечения взрывающейся проволоочки:

$$\tau_g = kS(U_0 / L)^{-2/3},$$

где  $k$  – постоянная, зависящая от свойств материала проволоочки;  $S$  – площадь поперечного сечения проволоочки,  $\text{см}^2$ ;  $L$  – индуктивность разрядного контура, Гн.

С увеличением диаметра проволоочки максимум мощности электрического разряда растет, достигая некоторого оптимального значения, а затем убывает.

Материал и размеры взрывающихся проволоочек влияют и на гидродинамические параметры электрического разряда, в частности на давление и скорость образующейся при разряде ударной волны.

Выбор размера проволоочек обусловлен соблюдением оптимальных параметров разряда как по электрическим, так и по гидродинамическим показателям.

Оптимальный диаметр медной проволоочки при разряде в воде определяют по эмпирической формуле

$$d_{opt} = 1,6 \cdot 10^{-5} C^{1/3} U^{1/2} L^{-1/6},$$

где  $C$  – емкость конденсаторов, Ф;  $U$  – напряжение, В;  $L$  – индуктивность разрядного контура, Гн.

Носителями энергии при искровом высоковольтном разряде в жидкости являются ударная волна и парогазовая сфера. В импульсной механической работе большинства технологических процессов, таких, как разрушение, дробление, формообразование, основное значение имеет энергия ударной волны, выделяющаяся в разрядном промежутке за первый полупериод колебания тока.

В соответствии с этим режимы работы электрогидравлической установки подбирают так, чтобы большая часть запасенной в конденсаторах – накопителях энергии выделилась в разрядном промежутке за первый полупериод колебания тока. Для питания импульсной энергией установок обработки различных материалов электрогидравлическим методом применяются специальные генераторы, принципиальные схемы которых аналогичны схеме на рис. 5.

Конденсатор-накопитель  $C$  заряжается от сети через автотрансформатор, повышающий трансформатор и выпрямитель. Значения импульсов тока в зарядной цепи ограничиваются зарядным сопротивлением. При пробое формирующего промежутка  $\Phi\Pi$  конденсатор разряжается на рабочий искровой промежуток  $R\Pi$  технологического устройства.

Энергетические возможности электрического разряда в непроводящей жидкости (воде) ограничиваются допустимым напряжением зарядки и емкостью конденсаторных батарей установок.

## Практическое занятие 6

### ПРИНЦИП РАБОТЫ, КОНСТРУКЦИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Цель занятия: изучение принципа работы, конструкции и применения гидравлических установок.

Очистка литья. Очистка литья от формовочной земли производится в воде и полностью исключает пылеобразование. При этом методе очищаемые отливки помещают в бак. После установки электродов относительно деталей последние очищаются от формовочной земли серией импульсов. Применение многоэлектродных трехфазных установок позволяет производить обработку сразу нескольких отливок, устанавливаемых относительно электродов в произвольном положении.

Формообразование – это процесс получения фасонных изделий из тонколистового материала с использованием направленных ударных волн высокой интенсивности, возникающих в жидкости при импульсном электрическом разряде. Основными факторами формообразования методом электрогидравлического разряда являются сверхвысокие ударные гидравлические давления, мощные кавитационные процессы, ультразвуковое излучение.

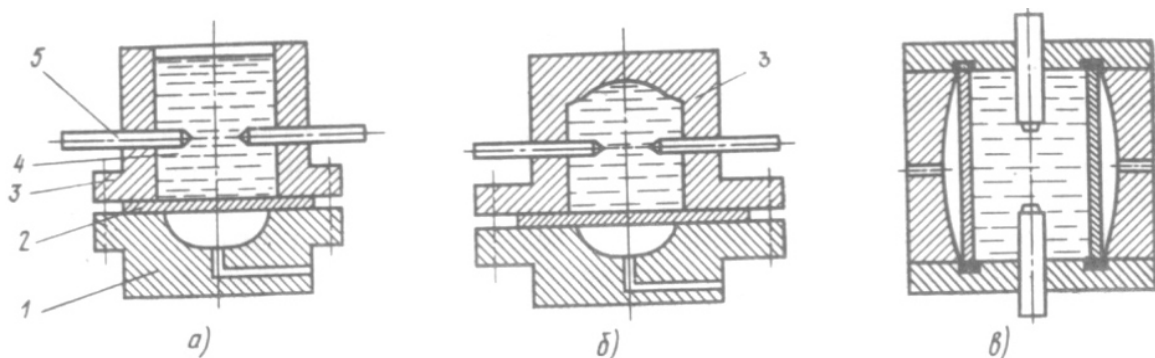


Рисунок 7 Схема электрогидравлической штамповки

Для получения различных по форме изделий создаются различные формы волн: с острым фронтом, сферические и др. Это достигается различным расположением электродов, а также различными формами проволочек, закорачивающих межэлектродный промежуток. Схема электрогидравлической штамповки детали показана на рис. 7. Листовую заготовку 2 укладывают на матрицу 1 и прижимают к ней с помощью прижимных устройств. Над заготов-

кой расположена жидкая передающая среда 4, в которой на определенном расстоянии от заготовки размещены положительный и отрицательный электроды 5, соединенные с генератором импульсов тока электрогидравлической установки.

При высоковольтном разряде между электродами возникает токопроводящий искровой канал, мгновенное расширение которого приводит к возникновению в жидкости ударной волны. Деформация листовой заготовки происходит под действием ударной волны, образующейся при расширении газовой сферы, и сопутствующего гидротока (рис. 7, а).

Более эффективному использованию энергии разряда способствует размещение рабочих электродов в замкнутой камере 3 (рис. 7, в) или внутри самой заготовки (рис. 7, в).

Изменяя расстояние между концами рабочих электродов, можно получить различную форму фронта ударной волны. Если расстояние между электродами достаточно мало, то возникает волна со сферическим фронтом. Если же электроды удалены друг от друга на несколько сантиметров, то образуется волна с цилиндрическим фронтом. Плоский фронт можно получить, применив тонкую проволочную сетку, которая мгновенно испаряется при прохождении импульса тока.

Форму фронта ударной волны можно привести в соответствие с формой рабочей полости матрицы, для чего проволоку, закорачивающую концы электродов, изгибают таким образом, чтобы разряд следовал по возникшему плазменному каналу.

Кроме рассмотренных установок с непосредственным воздействием рабочей среды на заготовку существуют устройства, в которых деформация заготовки производится посредством промежуточного звена (рис. 8). Под действием давления, возникающего в верхней части матрицы 2, пуансон 4 движется вниз и придает заготовке 5 необходимую форму.

Тонкое измельчение. При этом технологическом приеме материал диспергируется или разрушается волной, которая возникает при электрогидравлическом ударе в жидкости. Разрушающая способность волны зависит от параметров разрядного контура, а энергия импульса – от напряжения и емкости конденсатора.



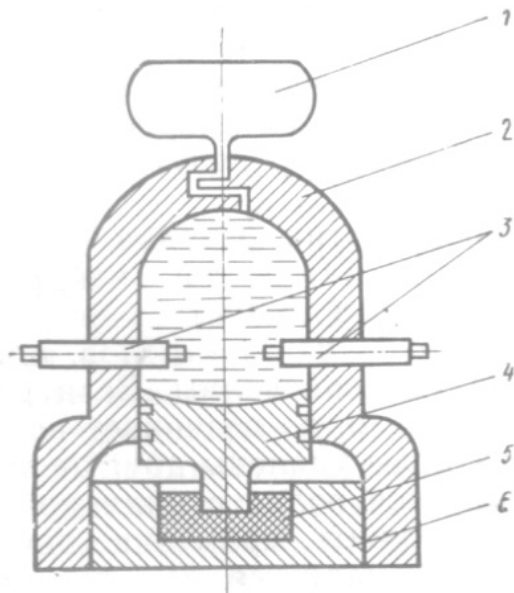


Рисунок 8 Электрогидравлическая установка для формообразования с жидким промежуточным звеном:

1 – резервуар; 2 – корпус; 3 – электроды; 4 – поршень с пупсопом; 5 – заготовка; 6 – матрица.

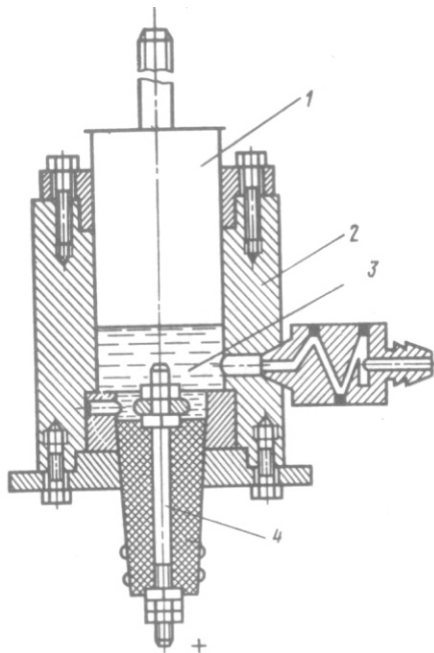


Рисунок 9 Схема электрогидравлического вибратора

Для дробления различных минеральных сред применяются специальные электрогидравлические вибраторы (ЭГ-вибраторы). Эти устройства просты и надежны. Они представляют собой систему цилиндр – поршень. Принципиальная схема электрогидравлического вибратора показана на рис. 9. Корпус вибратора 2 заполнен жидкостью 3 (водой). От специального источника питания на элек-

троды 4 вибратора подается высоковольтный импульс, вызывающий искровой разряд между ними. При этом в жидкости возникает импульс давления. Под его действием поршень 1 перемещается вдоль своей оси. Следствием движения поршня в полости цилиндра является разряжение, и под действием атмосферного давления поршень возвращается в исходное положение. Так осуществляется движение поршня назад-вперед. Оно характеризуется определенным механическим импульсом, который передается на обрабатываемый объект. Частота перемещения поршня задается частотой электрических разрядов в том случае, если общее время движения поршня вперед-назад меньше периода следования разрядов.

## **Практическое занятие 7**

### **ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И УСТРОЙСТВО ЭЛЕКТРОФИЛЬТРА**

Цель занятия: изучение устройства электрофильтров.

Общие положения

Электрофильтр — это устройство, в котором очистка газов от аэрозольных, твердых или жидких частиц происходит под действием электрических сил. В результате действия электрического поля заряженные частицы выводятся из очищаемого газового потока и осаждаются на электродах. Зарядка частиц происходит в поле коронного разряда. Электрофильтр представляет собой корпус прямолинейной или цилиндрической формы, внутри которого смонтированы осадительные и коронирующие электроды различной конструкции (в зависимости от назначения и области применения электрофильтра, а также от специфики улавливаемых частиц). Коронирующие электроды подключены к высоковольтному источнику питания выпрямленным током напряжением 50—60 кВ. Электрофильтры, в которых улавливаемые твердые частицы удаляются с электродов встряхиванием, называются сухими, а те, в которых осажённые частицы смываются с электродов жидкостью или улавливаются жидкими частицами (туман, брызги), — мокрыми.

По числу электрических полей, через которые очищенный газ последовательно проходит, электрофильтры подразделяют на однопольные и многопольные. Иногда электрофильтры разбивают на

параллельные по ходу газа камеры — секции. По этому признаку они могут быть одно- и многосекционными. Очищаемый в электрофильтре газ проходит активную зону в вертикальном или горизонтальном направлениях, поэтому электрофильтры бывают вертикальными или горизонтальными. По типу осадительных электродов электрофильтры делят на пластинчатые, рис.10 и трубчатые, рис.11. Основные конструкторские типы электрофильтров — горизонтальный пластинчатый и вертикальный трубчатый.

Чтобы понять принцип работы электрофильтра, следует сначала рассмотреть электрическую цепь. Она состоит из таких элементов, как источник тока и двух, параллельно расположенных друг к другу металлических пластин, которые разделены между собой воздухом. Это устройство представляет собой не что иное, как воздушный конденсатор, однако электрический ток в такой цепи течь не будет, потому что слой воздуха между пластинами, впрочем, и другие газы, не способен проводить электричество.

Однако стоит только приложить к металлическим пластинам необходимую разность потенциалов, как гальванометр, подключенный к этой цепи, зафиксирует прохождение электрического тока из-за ионизации слоя воздуха между этими пластинами.

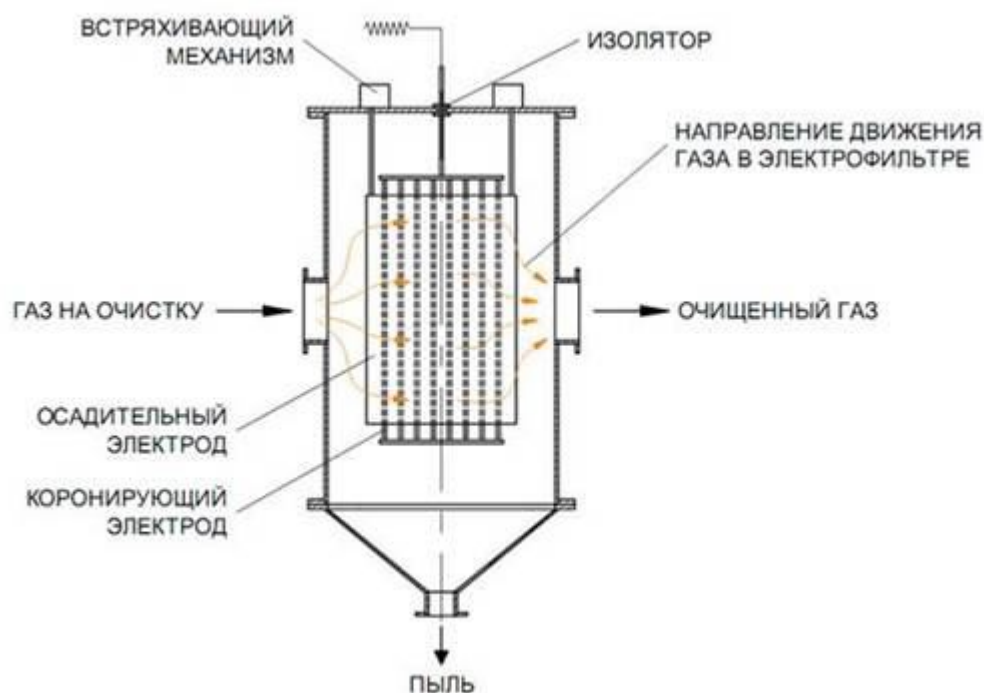


Рисунок 10 Горизонтальный пластинчатый электрофильтр

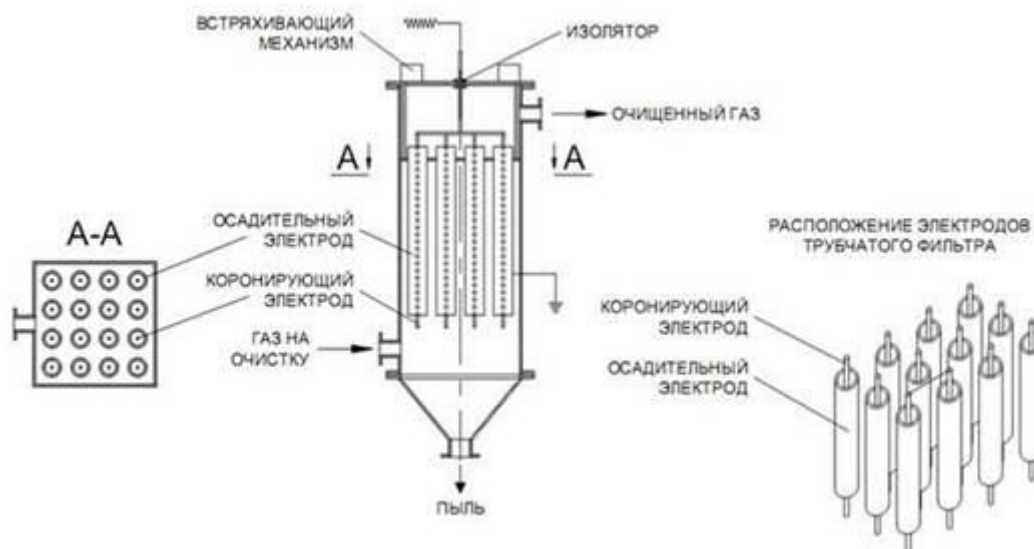


Рисунок 11 Трубчатый электрофильтр

Что касается ионизации газа между двумя электродами, то она может возникать в двух случаях:

1. Несамостоятельно, то есть с применением каких-либо «ионизаторов», к примеру, рентгеновских или других лучей. После того, как воздействие этого «ионизатора» будет закончено, начнет постепенно наступать рекомбинация, то есть будет происходить обратный процесс: ионы различных знаков вновь станут соединяться между собой, образуя тем самым электронейтральные молекулы газа.

2. Самостоятельно, осуществляется за счет повышения в электросети напряжения до величины, которая превышает величину диэлектрической постоянной используемого газа.

При электрической очистке газов применяется только вторая ионизация, то есть самостоятельная.

Если начать увеличивать разность потенциалов между металлическими пластинами, то в какой-то момент она обязательно достигнет критической точки (пробивное напряжения для слоя воздуха), воздух будет «пробит» и в цепи резко возрастет сила тока, а между металлическими пластинами появится искра, которую называли – самостоятельный газовый разряд.

Молекулы воздуха под напряжением начинают расщепляться на положительно и отрицательно заряженные ионы, и электроны. Под воздействием электрического поля ионы двигаются к электродам, которые заряжены противоположно. С увеличением напряжения электрического поля скорость, а, соответственно, и кинетическая энергия ионов и электронов начинает постепенно возрастать.

Когда их скорость доходит до критической величины и несколько превышает ее, они расщепляют все нейтральные молекулы, встречающиеся на пути. Так происходит ионизация всего газа, находящегося между двумя электродами.

Когда между параллельно расположенными пластинами одновременно образуется довольно значительное число ионов, сила электрического тока начинает сильно возрастать и появляется искровой разряд.

В силу того, что молекулы воздуха получают от ионов, движущихся в определенном направлении, импульсы, вместе с так называемой «ударной» ионизацией возникает еще и достаточно интенсивное движение воздушной массы.

Самостоятельную ионизацию в методике электроочистки газов осуществляют путем приложения на электроды высоких напряжений. При ионизации данным способом нужно, чтобы слой газа пробивало лишь на некотором отрезке расстояния между двумя электродами. Необходимо чтобы часть газа оставалась непробитой и служила в своем роде изоляцией, которая бы предохраняла от короткого замыкания параллельные электроды от возникновения искры или дуги (чтобы не произошло пробоя диэлектрика).

Создают такую «изоляцию» путем подбора формы электродов, а также расстояния между ними в соответствии с напряжением. Стоит отметить, что электроды, которые представлены в виде двух параллельных плоскостей, в этом случае не подойдут, так как между ними в любой точке поля всегда будет одинаковое напряжение, то есть поле будет неизменно однородным. Когда разность потенциалов между одним плоским электродом и другим достигнет величины пробивного напряжения, весь воздух будет пробит и появится искровой разряд, однако ионизации воздуха не случится в силу того, что все поле однородно.

Неоднородное поле может возникнуть только между электродами, которые имеют вид концентрических цилиндров (трубы и провода), либо же плоскости и цилиндра (пластина и провода). Непосредственно вблизи провода напряжение поля настолько большое, что ионы и электроны становятся способны к ионизации нейтральных молекул, однако по мере удаления от провода напряжение поля и скорость движения ионов настолько уменьшаются, что ударная ионизация попросту становится нереальной.

Соотношение между величиной радиуса трубы ( $R$ ) и провода

( $r$ ) должно быть обязательно определенным во избежание появления искры между двумя цилиндрическими электродами. Расчеты показали, что ионизация газа без короткого замыкания возможна при  $R/r$  больше или равным 2,72.

Появление вокруг проволоки слабого свечения или так называемой «короны» является основным видимым признаком того, что наступил ионный разряд. Такое явление называется коронным разрядом. Слабое свечение постоянно сопровождается характерный звук — это может быть потрескивание, либо же шипение.

Провод (электрод), вокруг которого возникает свечение, называют коронирующим электродом. «Корона» в зависимости от того каким полюсом соединен провод, бывает либо положительной, либо отрицательной. При электрической очистке газов используют только второй вариант, то есть отрицательную «корону». Хотя она, в отличие от положительной, менее равномерна, все же такая «корона» способна допускать более высокую критическую разность потенциалов.

К осадительным электродам предъявляются следующие требования: быть прочными, жесткими, иметь гладкую поверхность, чтобы можно было без проблем удалять уловленную пыль, а также достаточно высокие аэродинамические характеристики.

Осадительные электроды по форме и конструкции условно делятся на три больших группы: 1) пластинчатые; 2) коробчатые; 3) желобчатые.

К коронирующим электродам предъявляются следующие требования: должны иметь точную форму, чтобы обеспечить интенсивный и достаточно однородный коронный разряд; обладать механической прочностью и жесткостью, чтобы обеспечить надежную, бесперебойную и долговечную работу в условиях встряхивания и вибрации; быть простыми в изготовлении и иметь низкую стоимость, так как коронирующие электроды могут иметь достаточно большую длину; быть стойкими к агрессивным средам.

Различают две большие группы коронирующих электродов: электроды без фиксированных разрядных точек и электроды с фиксированными разрядными точками по всей длине электрода. У вторых источники разряда — это острые выступы или шипы, при этом есть возможность управлять работой электрода. Для этого нужно менять расстояние между шипами.

Систему осадительных и коронирующих электродов разме-

щают, как правило, внутри металлического сварного корпуса, в редких случаях в корпусе из железобетона, который изготовлен в форме П-образных рам. Оборудование внутрь корпуса загружают либо сверху, либо сбоку. Корпус снаружи должен обязательно иметь теплоизоляцию во избежание температурных деформаций и появления конденсации влаги.

Узел подвода и равномерного распределения запыленного воздуха, как правило, состоит из системы газораспределительных решеток, которые установлены перед главной камерой, где располагается система осадительных и коронирующих электродов, и представляет собой перфорированные листы, установленные в два яруса, их живое сечение составляет от 35 до 50 процентов.

Чтобы удалить уловленную пыль из электрофильтров, применяют специальные системы встряхивания электродов. В сухих электрофильтрах обычно используют несколько таких систем — это пружинно-кулачковая, ударно-молотковая, вибрационная, либо же магнитно-импульсная система. Кроме этого, уловленные частицы могут просто смывать с электродов водой.

Преимущества электрофильтров: возможность самой высокой степени очистки газов (до 99,9 %), низкие затраты энергии (до 0,8 кВт на 1000 м<sup>3</sup> газа), очистка газа может проводиться даже при высоких температурах, процесс очистки может быть полностью автоматизирован.

При расчете электрофильтров определяются площадь сечения, длина электродов, количество электрофильтров, скорость осаждения частиц пыли, скорость движения газов в электрофильтрах, крупность осаждаемых частиц и расстояния между электродами. Упрощенный расчет состоит из определения сечения фильтров и их количества по заданной производительности и скорости газов.

Обычно удельное электрическое сопротивление (УЭС) пылей, улавливаемых в электрофильтрах, находится в диапазоне  $10^2$ – $10^{12}$  Ом·м. Диэлектрическая проницаемость частиц изменяется в диапазоне от 2-х – для хороших диэлектриков и до бесконечности – для проводников. Диэлектрическая проницаемость частицы определяет ее поляризацию в электрическом поле и влияет на заряд и ориентацию частиц при движении их в межэлектродном промежутке электрофильтра.

Относительная диэлектрическая проницаемость (электрическая постоянная)  $\epsilon$  – величина, показывающая, во сколько раз сила

взаимодействия двух электрических зарядов в среде меньше, чем в вакууме.

Относительная диэлектрическая проницаемость равна:

- для газов при 0°С близка к единице (воздух – 1,00059; водяной пар при 100° С – 1,0006);
- для жидкостей при 20° С:
  - для воды – 81;
  - для спирта – 26;
  - для масла трансформаторного – 2,2;
- для твердых веществ:
  - гипс – 5;
  - кварц, сера – 5;
  - металлы -  $\infty$  ;
  - лед (при 10° С:) – 70;
  - окислы металлов – 12 – 18;
  - резина – 3 – 6;
  - стекло – 6,6 – 10,0;
  - фарфор – 4,4 – 6,8;
  - янтарь – 2,8.

### Пример расчета электрических характеристик электрофильтра

Выбрать и рассчитать электрофильтр серии УГ для очистки газов мартеновской печи при следующих исходных данных:

- расход влажного газа  $L_0 = 160000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;
- плотность газов  $\rho_0 = 1,31 \text{ кг/м}^3$ ;
- температура газов  $t = 180 \text{ °С}$ ;
- барометрическое давление  $P_{\text{бар}} = 101,3 \text{ кПа}$ ;
- разряжение в системе аспирации  $P_{\text{г}} = 2 \text{ кПа}$ ;
- рабочее напряжение  $U = 80 \cdot 10^3 \text{ В}$ ;
- состав дымовых газов:  $\text{CO}_2 = 13\%$ ,  $\text{H}_2\text{O} = 8,5\%$ ,  $\text{O}_2 = 6,5\%$ ,  $\text{N}_2 = 72\%$ ;
- концентрации пыли перед электрофильтром  $6 \text{ г/м}^3$

Дисперсный состав пыли с учетом коагуляции за счет подачи пара в газопоток:

Размер, мкм	<1	1-2	2-15	15-30	>30
Содержание, % (по массе)	5	10	70	10	5



Находим плотность газов при рабочих условиях:

$$\rho_2 = \frac{\rho_0 (P_{бар} - P_2) 273}{P_{бар} (273 + t)} = \frac{1,31(101,3 - 2)273}{101,3(273 + 180)} = 0,77 \text{ кг/м}^3$$

Определяем расход газов при рабочих условиях:

$$L_2 = \frac{L_0 \rho_0}{3600 \rho_2} = \frac{160000 \cdot 1,31}{3600 \cdot 0,77} = 76 \text{ м}^3/\text{с}$$

Зададимся скоростью  $w_r = 1,0$  м/с газа в электрофильтре и определим необходимую площадь поперечного сечения электрофильтра

$$F = L_r / w_r = 76 / 1,0 = 76 \text{ м}^2$$

4. Вследствие высокой дисперсности пыли выбираем наиболее эффективный электрофильтр типа УГ 22-3-74 с  $F_\phi = 74 \text{ м}^2$ . Далее уточняем фактическую скорость газа в электрофильтре:

$$w_r = L_r / F_\phi = 76 / 74 = 1,03 \text{ м/с}$$

5. Далее находим относительную плотность газов при стандартных условиях ( $P_{ст} = 101,3$  кПа;  $t_{ст} = 20$  °С)

$$\beta = \frac{(P_{бар} - P_r) T_{ст}}{P_{ст} (273 + t)} = \frac{(101,3 - 2)(273 + 20)}{101,3(273 + 180)} = 0,63$$

6. Определим критическую напряженность электрического поля электрофильтра:

$$E_{кр} = 3,04 \left( \beta + 0,0311 \sqrt{\frac{\beta}{R_1}} \right) \cdot 10^6 = 3,04(0,63 + 0,0311 \sqrt{0,63/0,001}) \cdot 10^6 = 4,28 \cdot 10^6 \text{ В/м}$$

где  $R_1$  – радиус острия коронирующего электрода, принимаем равным 1 мм

7. Определяем критическое напряжение короны для пластинчатого электрофильтра типа УГ:

$$\begin{aligned} U_{кр} &= E_{кр} \cdot R_1 \left( \frac{\pi H}{S} - 2,3 \lg 2\pi \frac{R_1}{S} \right) = \\ &= 4,28 \cdot 10^6 \cdot \\ &\cdot 0,001 \left( 3,14 \cdot \frac{0,275}{0,18} \cdot 2 - 2,3 \cdot \lg 2 \cdot 3,14 \cdot \frac{0,001}{0,18} \right) = \\ &= 24600 \text{ В} \end{aligned}$$

где  $H$  – расстояние между плоскостями коронирующих и осадительных электродов, м;  $H = 0,275/2$  м;  $S$  – шаг коронирующих электродов, м;  $S = 0,18$  м

8. Далее определим линейную плотность тока короны:

$$\begin{aligned}
 I &= \frac{4\pi^2 \cdot K \cdot f \cdot U(U - U_{KP})}{9 \cdot 10^9 \cdot S^2 \left( \frac{\pi H}{S} - 2,3 \cdot \lg 2\pi \cdot R_1/S \right)} = \\
 &= \frac{4 \cdot 3,14^2 \cdot 2,1 \cdot 10^{-4} \cdot 0,055 \cdot 80000(80000 - 24600)}{9 \cdot 10^9 \cdot 0,18^2 \cdot \left( \frac{3,14 \cdot 0,275}{0,18 \cdot 2} - \frac{2,3 \lg 2 \cdot 3,14 \cdot 0,001}{0,18} \right)} = \\
 &= 0,12 \cdot 10^{-3} \text{ A/M}
 \end{aligned}$$

где  $K$  – подвижность ионов, для воздуха  $K = 2,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ ;  
 $f$  – коэффициент, зависящий от отношения  $H/S$ , его значения принимаем по таблице 1.

Таблица 1 – значение поправочного коэффициента  $f$

H/S	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
f	0,08	0,068	0,046	0,035	0,027	0,022	0,017	0,015	0,013	0,011

При  $H/S = 0,275/(2-0,18) = 0,76$  коэффициент  $f = 0,055$

9. Напряженность электрического поля определяем по формуле:

$$\begin{aligned}
 E &= \sqrt{\frac{8 \cdot I \cdot H}{4\pi \cdot K \cdot \varepsilon_0 \cdot S}} = \sqrt{\frac{8 \cdot 0,12 \cdot 10^{-3} \cdot 0,138}{4 \cdot 3,14 \cdot 2,1 \cdot 10^{-4} \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,18}} = \\
 &= 1,78 \cdot 10^5 \text{ В/м}
 \end{aligned}$$

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

## Практическое занятие 8

### ИЗУЧЕНИЕ МЕТОДА ОКРАСКИ РАСПЫЛЕНИЕМ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Цель занятия: изучение метода окраски распылением в электростатическом поле высокого напряжения

#### Общие положения

Принципиальная схема установки для окраски металлических изделий в высоковольтном электрическом поле показана на рис. 12. На заземленном конвейере 1 подвешивают подготовленные к окраске изделия 2. Конвейер движется от входа камеры к ее выходу 3. Внутри камеры сверху и снизу конвейера на изоляторах 5 подвешены рамы с металлическими сетками 6, соединенными с высоковольтным выпрямителем 4 и являющимися коронирующими электродами. При заданном напряжении между сетками и конвейером начинается коронный разряд.

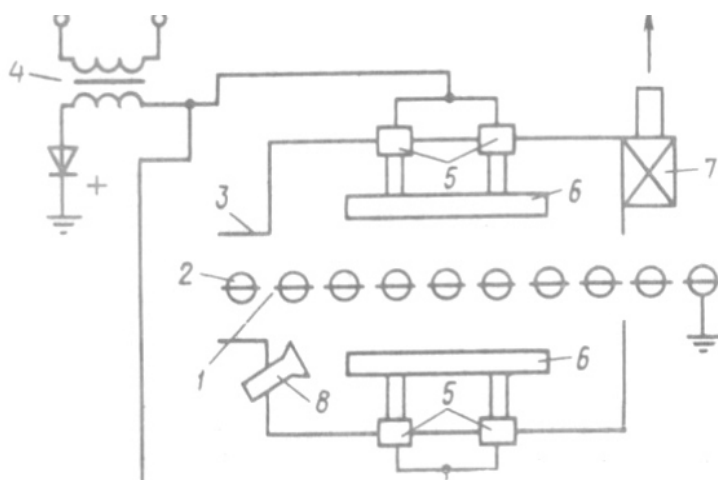


Рисунок 12 Схема установки для окраски изделий в электростатическом поле

Вдуваемые пневматическим распылителем через сопло 8 частицы краски заряжаются в электрическом поле и, превратившись в отрицательные ионы, движутся к положительно заряженным изделиям (аноду). Заряженные частицы падают на изделия со всех сторон и равномерно окрашивают плотным слоем краски всю его поверхность. В камере окраски установлен вытяжной вентилятор 7, удаляющий из камеры пары растворителей и обеспечивающий заданный состав атмосферы.

Электронно-ионная технология с успехом применяется в

сельском хозяйстве при опрыскивании растений, в кабельной и резиновой промышленности для припудривания изделий из резины и для других тонких операций.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М. Электротехнические материалы [Текст]: учебник / Л.: Энергоатомиздат, Ленингр.отд., 1985. -304 с.
2. Индукционные плавильные печи [Текст] : учебное пособие / А.М. Вайнберг - М.: Энергия, 1967. 416 с.
3. Фарбман С.А., Колобнев И.Ф. Индукционные печи для плавки металлов и сплавов. Изд. доп. и перераб. М.: Metallurgy, 1968. - 496 с.
4. Цыганов В.А. Плавка цветных металлов в индукционных печах. М.: Metallurgy, 1974. - 248 с.
5. Башенко В.В., Донской А.В., Соломахин И.М. Электроплавильные печи цветной металлургии. М.: Metallurgy, 1971. - 320 с.
6. Фомин Н.И., Затуловский Л.М. Электрические печи и установки индукционного нагрева. М.: Metallurgy, 1979. 247 с.
7. Установки индукционного нагрева: Учебное пособие для вузов /А.Е. Слухоцкий, В.С. Немков, Н.А. Павлов, А.В. Бамунэр; Под. ред. А.Е. Слухоцкого. Л.: Энергоиздат, Ленинградское отделение, 1981. - 328 с.
8. Электротермическое оборудование: Справочник /Под общей ред. А.П. Альтгаузена. М.: Энергия, 1980. - 416 с.
9. ГОСТ Р 51707-2001. Электрофильтры. Требования безопасности и методы испытаний. Введ. 29.01.2001. М: Изд-во стандартов, 2001.
10. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004.
11. Санаев Ю.И. Электрофильтры: монтаж, наладка, испытание, эксплуатация./Обзорная информация. Серия ХМ-14. М., «ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ», 1984.