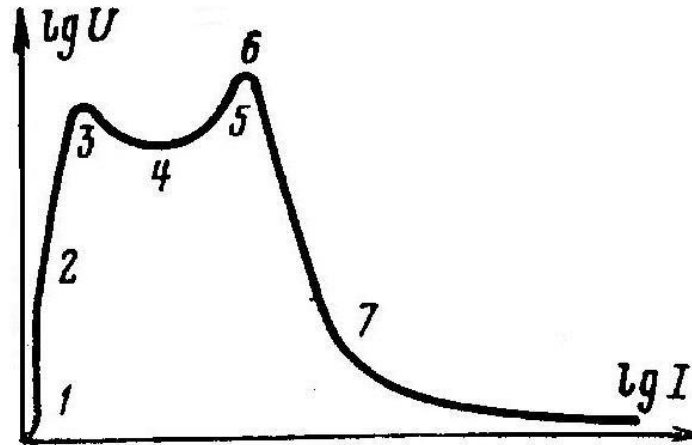


# **Общие сведения об электрических разрядах в газах**

**Газовым разрядом** называют процессы, протекающие в газах при прохождении через них электрического тока. В обычных условиях газ не электропроводен и для протекания тока необходимо создания определенных условий. В первую очередь они связаны с появлением в объеме газа электрических зарядов и наличием электрического поля, обеспечивающего их перемещение. Источниками заряженных частиц является отрицательный электрод, поставляющий с помощью различных процессов в разрядный промежуток электроны, и процессы ионизации нейтрального газа, протекающие в промежутке при взаимодействии частиц.

Газовые разряды разделяются на  
**самостоятельные и несамостоятельные**



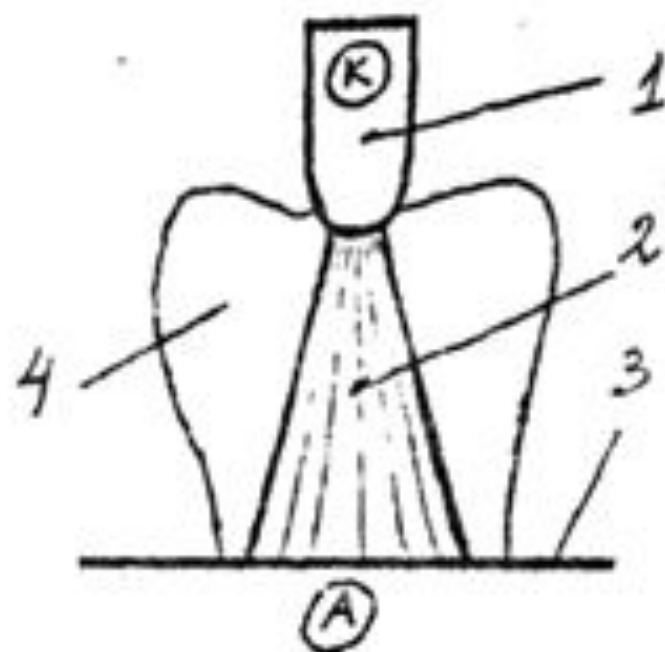
Участок 1-2 описывает несамостоятельный разряд.

При повышении напряжения скорость частиц и их кинетическая энергия под действием электрического поля уже становится достаточной для ионизации газа. Разряд постепенно переходит в стадию самостоятельного сначала «темного», а потом тлеющего разряда (участок 3-4). При дальнейшем росте напряжения разряд через стадию аномального тлеющего разряда (участок 4-5) переходит к искровому (5-6), а затем к дуговому (7).

В электротехнологии наиболее распространены тлеющий и дуговой разряды. Они различаются не только значениями напряжения и плотностей тока, но и разным характером распределения зарядов внутри промежутка. Если при тлеющем разряде внутри промежутка существуют явно выраженные нескомпенсированные заряды и плазма разряда неравновесна, то при дуговом разряде нескомпенсированные электрические заряды сосредоточены только в приэлектродных областях, а основной промежуток (т.н. положительный столб) квазинейтрален. Отличительной особенностью дугового разряда является низкие приэлектродные падения потенциала, сравнимые с потенциалом ионизации газа в промежутке. Это объясняется тем, что действующие в дуге механизмы эмиссии электронов с катода обеспечивают почти полную величину тока разряда. В тлеющем же разряде для обеспечения необходимого электронного тока требуется резкое увеличение прикатодного падения потенциала (до сотен В).

# **Основы теории свободногорящей электрической дуги**

**Электрическая дуга** – особый вид разряда в газах. Особенность – сосредоточение нескомпенсированных зарядов только в приэлектродных областях. Она характеризуется высокими токами (до 100 кА) и сравнительно низкими напряжениями (десятки вольт).



**Строение электрической дуги:**

1 - электрод-катод; 2 - столб дуги; 3 - электрод-анод; 4 - факел дуги

# Виды эмиссии электронов с катода

В проводящем материале электродов имеется большое количество свободных электронов, однако они не могут покинуть поверхность из-за наличия потенциального барьера.

Для освобождения электрона ему необходимо придать дополнительную энергию, равную работе выхода

Необходимо, чтобы  $W_{\text{кин.эл.}} \geq W_{\text{вых}}$  .

## Виды эмиссии электронов с катода:

- **термоэлектронная** (за счет высокой температуры катода);
- **автоэлектронная** (за счет высокой напряженности поля).

При ДСП проявление видов эмиссии неодинаково в разные полупериоды. При нахождении катода на угольном электроде из-за высокой температуры торца (4200К)  $j_{тэ} \sim 200 \text{ A/cm}^2$ , а для кипящей стали (2500К) –  $0,02 \text{ A/cm}^2$ . Поэтому в полупериод, когда катодом является металл сильно развита и автоэлектронная эмиссия. Особенно сильно это выражено в период расплавления. Это явление является основой вентильного эффекта в дуге.



# Термоэлектронная эмиссия

При термоэлектронной эмиссии увеличение кинетической энергии электронов происходит за счет повышения температуры катода и увеличения скорости и амплитуды теплового движения  $mv_x^2 \geq W_{\text{вых}} = e_0 U_{\text{вых}}$

Интенсивность термоэлектронной эмиссии зависит от температуры и материала катода и описывается уравнением Ричардсона-Дэшмана, где

$$j_{\text{т.э.}} = A_1 T^2 e^{-\frac{B}{T}}$$

$j_{\text{т.э.}}$  - плотность тока термоэлектронной эмиссии;  $T$  - температура  
 $A_1$  и  $B$  - коэффициенты, зависящие от материала электрода

Металл	$A_1$	$B_1 \cdot 10^4$
Ca	0,12	3,5
C	5,93	4,57
W	60,2	5,27

В дуговых печах повышение температуры катода осуществляется бомбардировкой катода положительными ионами. Нейтрализуясь на поверхности катода, ионы отдают свою энергию и разогревают его. Средняя температура катода зависит от агрегатного состояния материала электрода и ограничена температурой плавления для плавящегося катода, испарения для жидкого либо температурой сублимации для графита (4200 К). Так, в дуговых вакуумных печах температура катода из вольфрама составляет 3000К, а из стали – всего 1800К. При этом плотность тока термоэлектронной эмиссии для вольфрама составит  $22 \text{ A/cm}^2$ , а для стали  $4 \cdot 10^{-3} \text{ A/cm}^2$ .

## Автоэлектронная эмиссия

Если в прикатодной области создать сильное электрическое поле с напряженностью  $10^6 - 10^7$  В/см, то электроны могут быть оторваны от катода и без повышения температуры. Такая эмиссия называется электростатической или автоэлектронной. По уравнению Фаулера и Нордгейма плотность тока автоэлектронной эмиссии равна

$$j_{\text{а.э.}} = A_2 E^2 e^{-\frac{B_2}{E}}$$

где  $E$ - напряженность электрического поля около катода; коэффициенты  $A_2$  и  $B_2$  зависят от материала электрода.

Автоэлектронная эмиссия в чистом виде проявляет себя лишь при температурах до 10000К. В электротермических установках эти температуры значительно выше и поэтому в них присутствуют оба вида эмиссии.

Соотношение плотностей токов термоэлектронной и автоэлектронной эмиссий для разных установок разное. Для вакуумных дуговых печей при плавке тугоплавких металлов основная часть тока определяется термоэлектронной эмиссией, а при ВДП стали и титана – автоэлектронной. При ДСП явления эмиссии неодинаковы в разные полупериоды. При нахождении катода на угольном электроде из-за высокой температуры торца ( $4200^{\circ}\text{K}$ ) плотность тока термоэлектронной эмиссии составляет около  $2 \cdot 10^3 \text{ A/cm}^2$ . Когда же катод в другой полупериод переходит на стальную шихту, то плотность тока термоэлектронной эмиссии резко снижается до  $4 \cdot 10^{-3} \text{ A/cm}^2$

Необходимость привлечения автоэлектронной эмиссии к протеканию тока в разряде приводит к изменению приэлектродных процессов и электрических характеристик дуги в разные полупериоды. Это явление является основой вентильного эффекта в дуге при протекании переменного тока.

# Процессы в промежутке:

## Ионизация:

- «толчком» (взаимодействие электронов с атомами газа);
- Термическая (взаимодействие атомов и тяжелых ионов между собой из-за теплового движения).

## Деионизация:

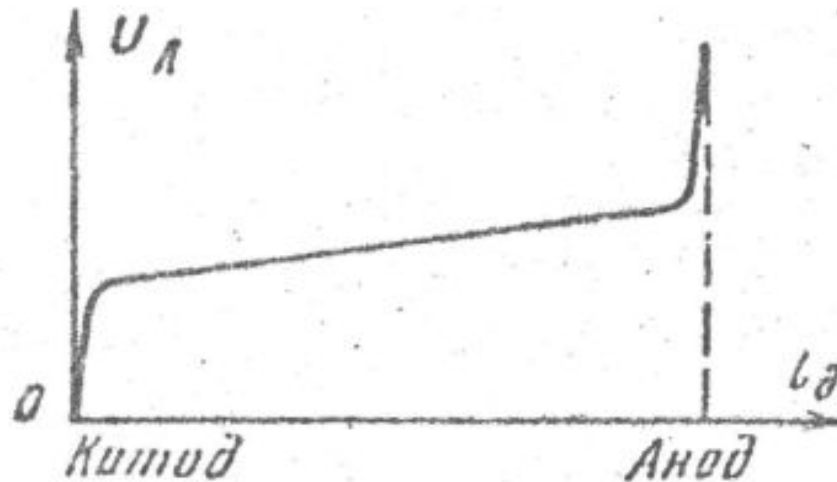
- Рекомбинация ионов;
- Диффузия ионов из столба дуги.

Локальное термическое равновесие стационарной дуги (ЛТР) при равенстве скоростей ионизации и деионизации. Степень ионизации, определяющая проводимость промежутка зависит от давления и температуры.

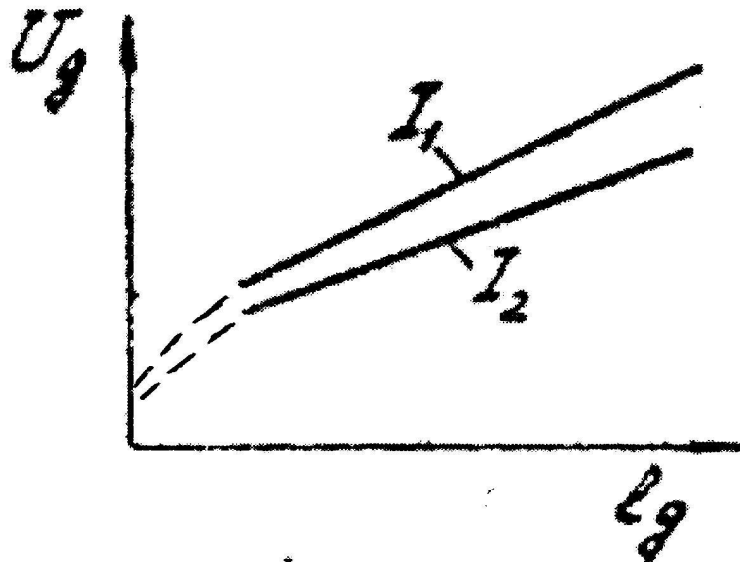
# Классификация электрических дуг

1. Свободно горящие и обжатые (плазменные).
2. Дуги с холодным и горячим катодом. Это разделение по преимущественному влиянию вида эмиссии (автоэлектронной или термоэлектронной).
3. По роду среды в разрядном промежутке – дуги в газах и в парах.
4. По характеру взаимодействия катода и анода дуги разделяются на длинные и короткие. Длинные – когда процессы на К и А протекают независимо. Короткие – когда существует тесная взаимосвязь..
5. По роду тока – постоянного тока (стационарные дуги) и переменного тока (квазистационарные дуги).
6. По давлению – атмосферного (ДСП) и пониженного (вакуумные).

# Распределение потенциала по длине дуги постоянного тока



## Регулировочная характеристика дуги

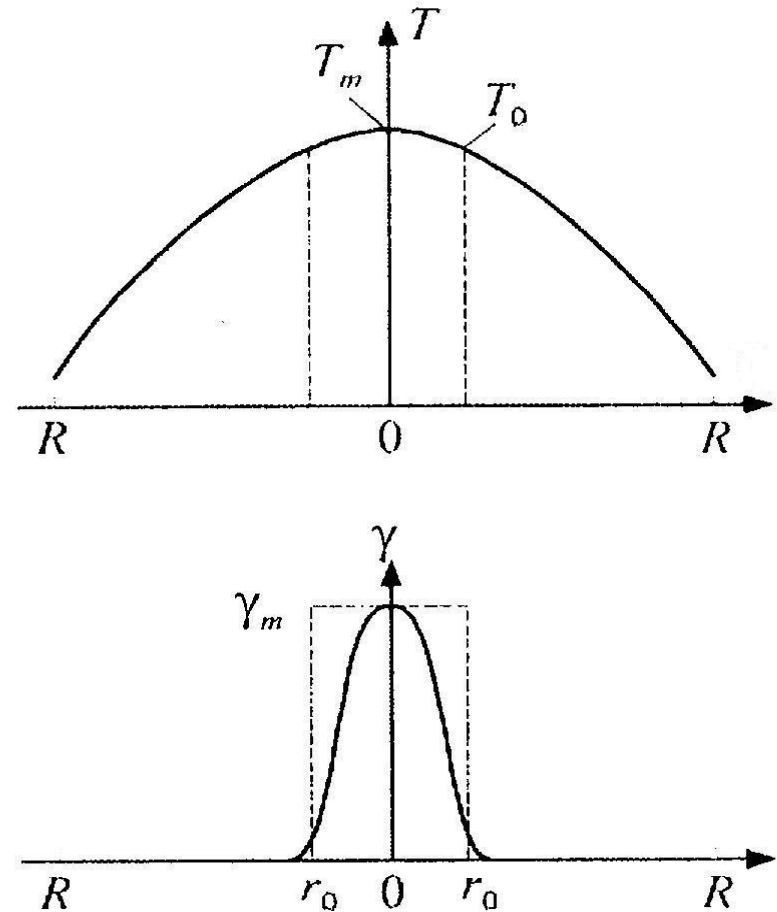
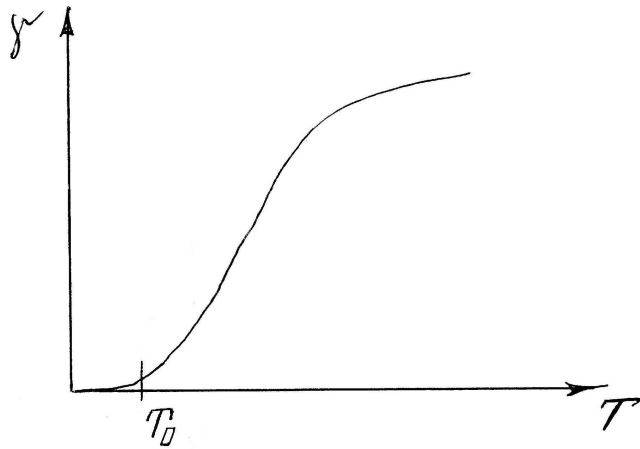


Формула Фрелиха

$$U_d = \alpha + \beta l_d$$

# Изменение по радиусу столба температуры и удельной электропроводности дуги

Качественный характер изменения электропроводности плазмы дуги от температуры



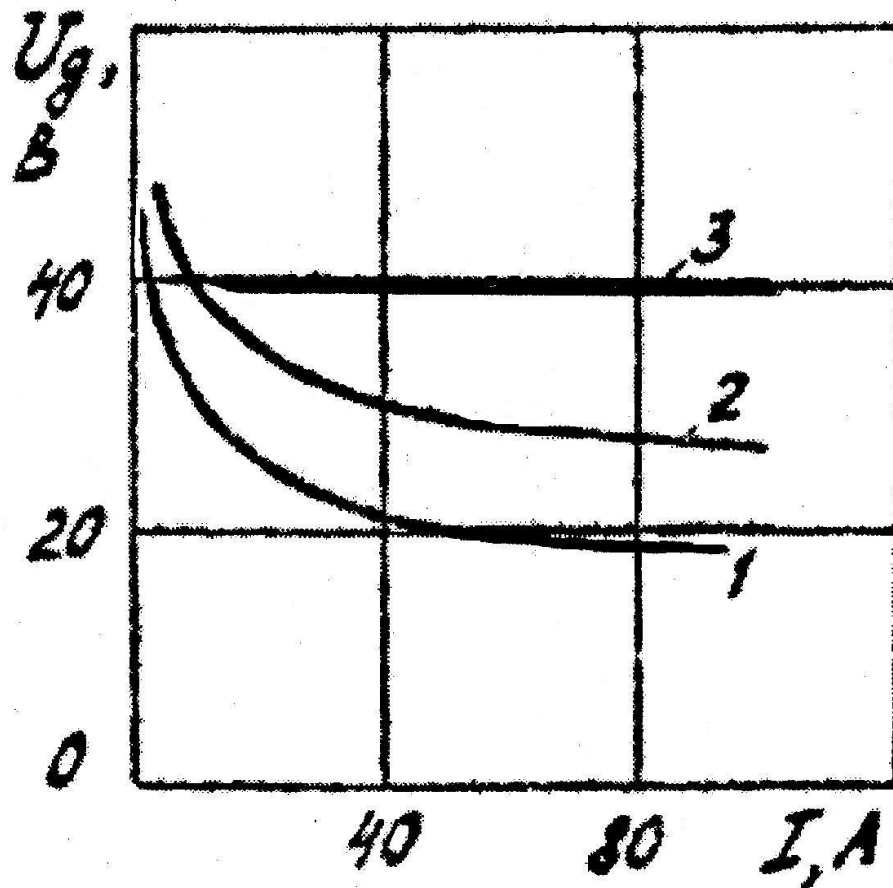


# Влияние плазмообразующего газа на температуру поверхности дуги

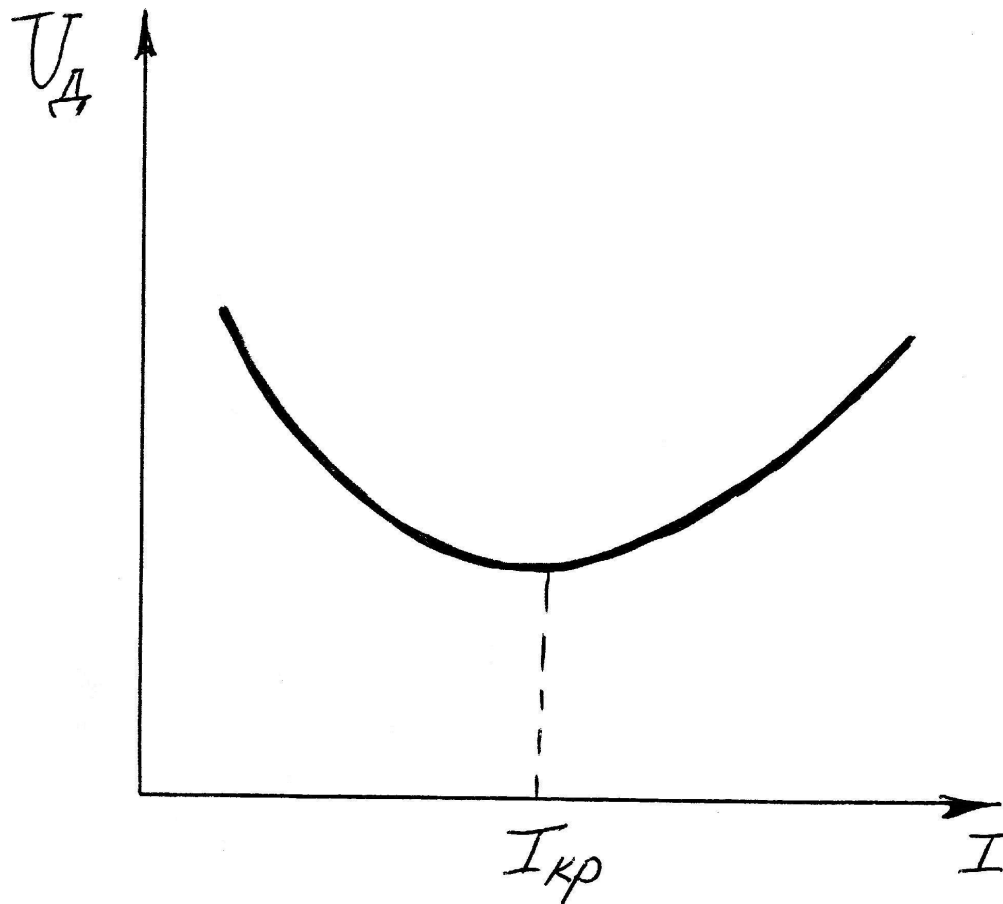
Параметр	Род плазмообразующего газа						
	Аргон	Гелий	Водород	Ar 90 %	Азот	Воздух	Оксид углерода
$T_{sa}, K$	5620	9280	5930	6000	6220	5040	5090
$S_{sa}, kW/m$	0,51	11,52	27,34	2,33	3,12	1,64	2,33

# Статические ВАХ дуги постоянного тока при различных видах теплопередачи:

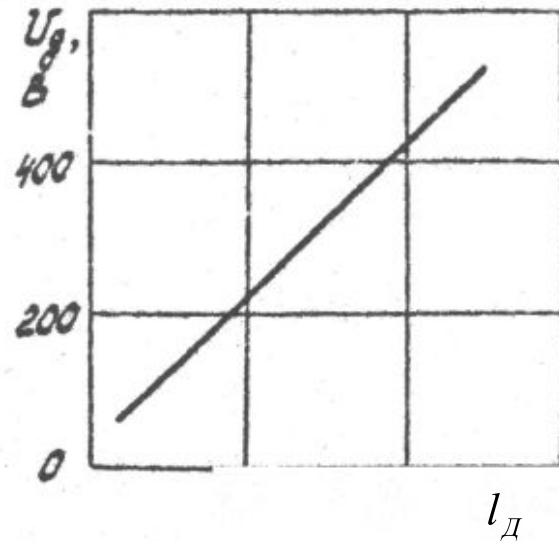
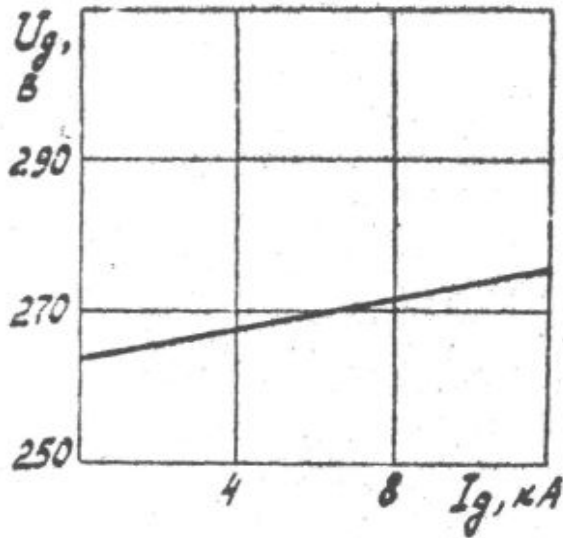
1 – теплопроводность; 2 – излучение; 3 – конвекция, объемное охлаждение



# Общий вид ВАХ дуги постоянного тока



# Электрические характеристики мощной дуги в ДСППТ



# Переходные режимы дуги постоянного тока

## Инерционность дуги

Уравнение Майра

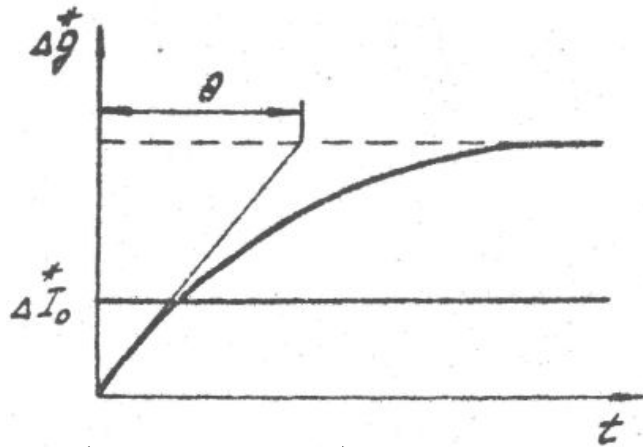
$$\theta \frac{dg}{dt} + g = \frac{i^2}{P_{пот}},$$

где  $g$  – проводимость столба дуги;  $i$  – ток;  $P_{пот}$  – мощность потерь;  $\theta$  – постоянная времени тепловых процессов в дуге.

Так как проводимость является функцией температуры, то аналогично зависит и температура от мощности

**Изменение постоянной времени дуги во время плавки, мс**

Расплавление	0.1-0.5
Доплавление	1.0
Окисление	3.0
Рафинирование,	5.0

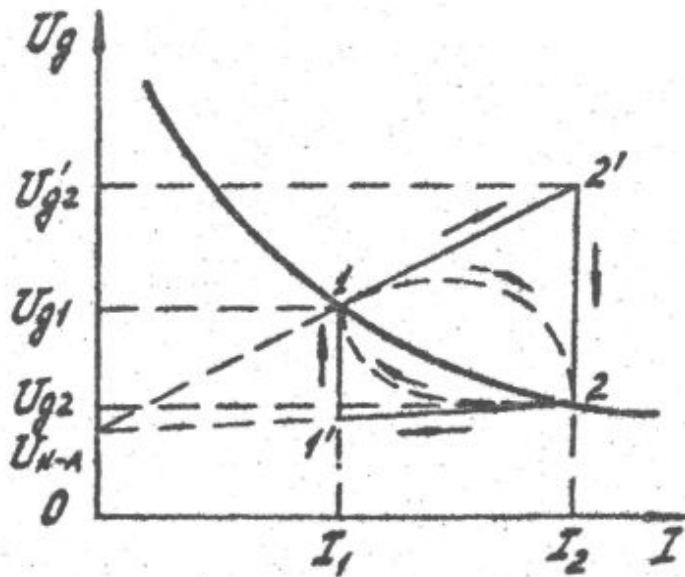


$$\Delta g^*(t) = K_d \Delta I_o^* \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\Theta}\right) \right]$$

$$\Delta g^*(p) = \frac{K_d}{1 + p\Theta} \cdot \Delta i^*(p) \quad \Delta g^* = \Delta i^* - \Delta u_{CT}^*$$

$$\Theta \cdot \left( \frac{d\Delta i^*}{dt} - \frac{d\Delta u_{CT}^*}{dt} \right) + \Delta i^* - \Delta u_{CT}^* = K_d \Delta i^*$$

$$\Theta \cdot \frac{d\Delta u_{CT}^*}{dt} + \Delta u_{CT}^* = \Theta \cdot \frac{d\Delta i^*}{dt} + (1 - K_d) \Delta i^*$$



$$\Delta u_{CT}^*(p) = \left( 1 - \frac{K_d}{1 + p\Theta} \right) \cdot \Delta i^*(p)$$

$$R(p) = \frac{\Delta u_{CT}^*(p)}{\Delta i^*(p)} = 1 - \frac{K_d}{1 + p\Theta}$$