

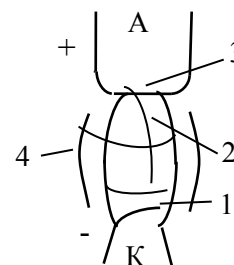
Лекция 7

ДУГОВОЙ РАЗРЯД

Дуговой разряд является одним из наиболее известных разрядов, нашедших большое практическое применение. Первооткрывателем разряда считается российский ученый Петров В.В., который в 1802 г. впервые получил данный разряд на угольных электродах при использовании аккумуляторной батареи. Достаточно известным определением дугового разряда считается следующее: дуга – форма разряда, существующая при большой плотности разрядного тока и при катодном падении (потенциала) всего в несколько десятков вольт. Для дугового разряда типична термоэлектронная эмиссия, ввиду достаточно высокой температуры катода. Название “дуга” связана с немного изогнутой формой разряда в следствии действия архимедовой силы при горизонтальном расположении электродов. Для различных разновидностей разрядов сила тока и плотность тока находятся в достаточно широком диапазоне: $I \sim 1-10^5$ А, $j \sim 10^2 - 10^7$ А/см². Ввиду данных параметров температура дуги часто достигает 10000 К, а в некоторых видах дуг 50000 К.

Как правило, дуга зажигается при соприкосновении электродов, с последующим их разведением на определенное расстояние. Рассмотрим схематическое расположение основных областей дугового разряда (рис.1). Вблизи катода находится отрицательная область (1), в которой ионизация обеспечивается преимущественно электронным ударом. К аноду примыкает положительный столб (2), в котором наиболее характерным процессом является термоионизация. Термическое действие электронов приводит к образованию в аноде положительного кратера (3). Ввиду сильного ультрафиолетового излучения, свойственного дуговым разрядам дугу нередко окружают ореолы (4).

Рис.1



Классификация дуговых разрядов осуществляется по следующим критериям. Основным фактором является тип эмиссии электронов с катода: 1) термоэлектронная, 2) автоэлектронная, 3) термоэлектронная и автоэлектронная (смешанный вид). Термоэлектронная эмиссия наиболее характерна для дуг атмосферного давления. Два последних вида эмиссии более типичны для дуг, возникающих при пониженном давлении и в вакууме. Другая классификация связана с давлением газовой среды дугового разряда: 1) вакуумная ($p < 10^{-3}$ торр), 2) низкого давления ($p \sim 10^{-3} - 1$ торр), 3) высокого давления ($p \geq 0,1$ торр), 4) сверхвысокого давления ($p \geq 10$ торр).

Для дуговых разрядов характерно образование на катоде специфической области, с которой возникает основной поток термоэмиссии – катодного пятна. Для угольной дуги при токе $I = 1,5 - 10$ А и давлении $p = 1$ атм. размер катодного пятна составляет $S \approx 0,02$ см² при плотности тока $j \approx 470$ А/см². Столь малые размеры данной области объясняются притяжением токов вблизи катодного пятна.

Рассмотрим вольтамперные характеристики (ВАХ) угольной дуги (рис.2). Данная дуга используется обычно в качестве эталонного разряда, т.к. дуги на металлических электродах содержат более сложные характеристики. Для данного примера катодное и анодное падение потенциала в разряде составляли $U_K=10$ В, $U_A=11$ В. В качестве варьируемого параметра выбиралось расстояние между электродами l . ВАХ содержат следующие основные области: спадающие зависимости, характеризующие область стабильного горения (а), область нестабильного горения (б), в которой зажечь разряд практически невозможно, область “шипения” (в), где разряд обладает специфическими звуковыми эффектами.

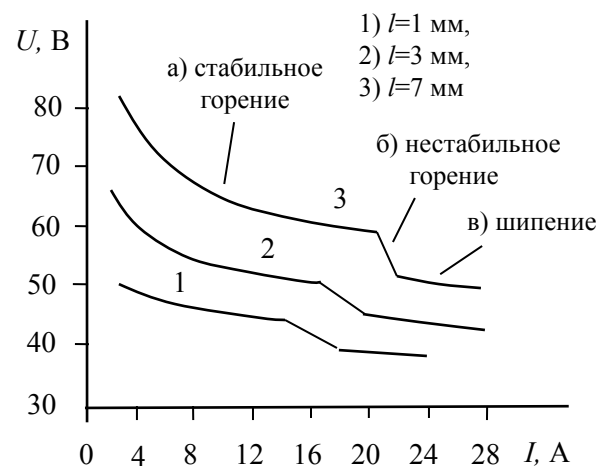


Рис.2

В качестве аппроксимационной зависимости для области стабильного горения угольной дуги в начале XX века была предложена формула Айтрон:

$$U = a + bl + \frac{c + dl}{I}$$

В данной формуле коэффициенты a, d, c, d зависят от рода газа, давления, условий горения дуги, циркуляции газа, охлаждения электродов, от размеров и формы электродов и прочих свойств угля.

Для мощности угольной дуги могут быть получены следующие выражения:

$$P = IU = (a + bl)I + (c + dl)$$

$$P = IU = (bI + d)l + (c + aI)$$

Из данных формул следует, что мощность пропорциональна току (при $l = const$), либо пропорциональна расстоянию между электродами (при $I = const$).

Для металлических электродов аналогичная формула имеет вид:

$$U = a + bl + \frac{c + dl}{I^n}$$

В формуле коэффициенты a, b, c, d зависят от рода металла, внешних условий еще сильнее, чем в случае угольной дуги. Показатель степени для большинства металлов находится в диапазоне $n=0,34-1,38$.

Как и в случае тлеющего разряда дуговой характеризует типичная зависимость потенциала (рис.3а). Катодное и анодное падения потенциала, как правило, невелики (10-20 В), а основной ход зависимости практически линейный. Данная зависимость является экспериментальной. Для плотностей токов характерны следующие зависимости (рис.3б). Плотность электронного тока j_e содержит рост в катодном слое и достигает максимума на аноде. Ионный ток j_i имеет сильный рост также вблизи катода и достигает максимума на катоде.

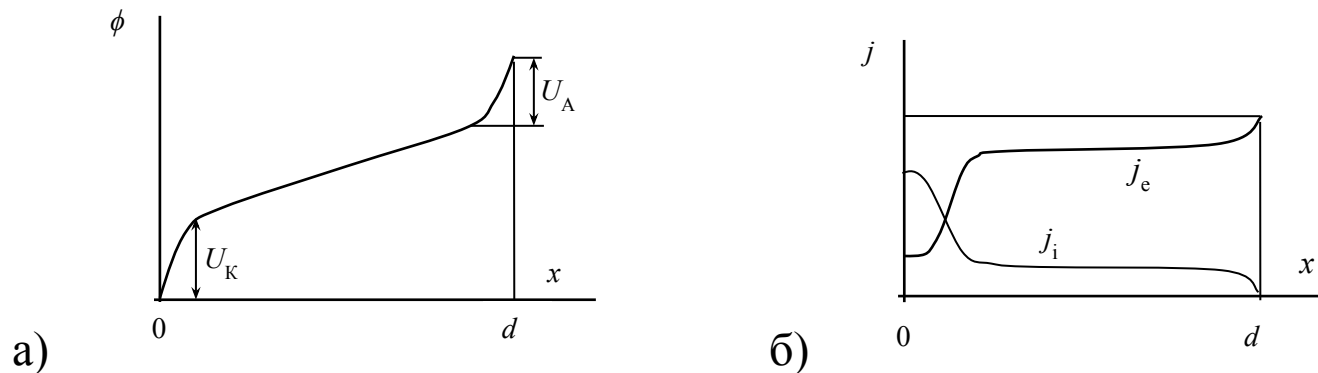


Рис.3

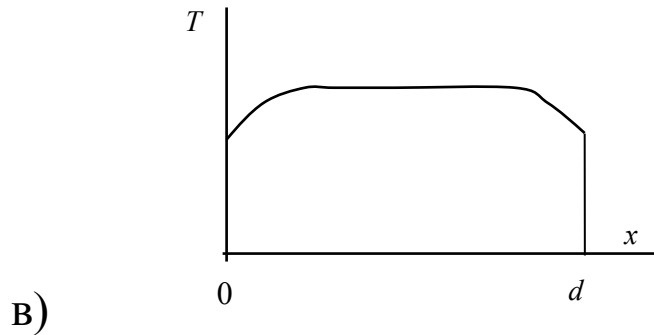


Рис.3

Непосредственно примыкающий к катоду и связанный с ростом потенциала катодный слой характеризует область, где ионизация происходит за счет электронного удара. Ввиду растущей зависимости концентрации плазмы (от катода) данный слой содержит бесстолкновительный слой (1) (у катода) и квазинейтральный слой $n_i \approx n_e$ (рис.4). Для тока термоэлектронной эмиссии вводятся величина S через отношение электронного тока к общему току:

$$S = \frac{j_e}{j} \approx 0,7 - 0,9$$

Данное значение означает, что около 70% тока в катодном слое переносится электронами, а около 30% ионами.

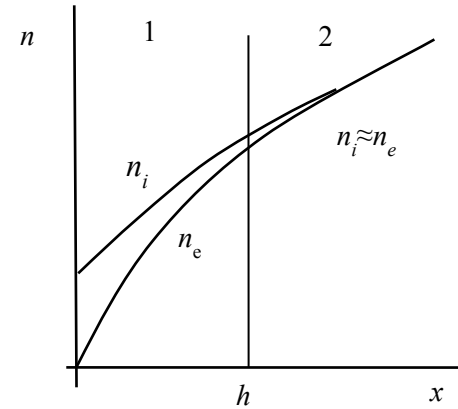


Рис.4

Величина, характеризующая размеры данного слоя h находится из следующего соотношения:

$$h = \frac{4U_K}{3E_K}$$

В качестве типичного примера можно привести угольную дугу атмосферного давления ($j=3 \cdot 10^3$ А/см², $S=0,8$; $V_K=10$ В), для которой напряженность электрического поля и размер катодного слоя имеют следующие значения:

$$E_K \approx 6 \cdot 10^5 \text{ В/см}, \quad h \approx 2 \cdot 10^{-5} \text{ см}$$

Для напряженности электрического поля была получена формула Маккоуна, использующая в качестве исходной уравнение Пуассона:

$$E_K^2 = \frac{16\pi}{\sqrt{2e}} (j_p m_p^{\frac{1}{2}} - j_e m_e^{\frac{1}{2}}) U_K^{\frac{1}{2}} = \frac{16\pi j}{\sqrt{2e}} ((1-s)\sqrt{m_p} - s\sqrt{m_e}) \sqrt{U_K}$$

Измерение температуры в дуговом разряде обычно осуществляется спектральными методами: посредством пирометрии и методом относительных интенсивностей спектральных линий. Приведем распределение температуры дуги, полученное методом относительных интенсивностей (рис.5). Дуговой разряд на угольных электродах при атмосферном давлении имел следующие параметры: $I=200$ А, $d=4,6$ см, $T_K=3500$ К, $T_A=4200$ К, $d_A=3$ см, $d_K=5$ мм. Максимальная температура (около 12000 К) присутствует вблизи катода. В остальной области, имеющей цилиндрическую форму, температура составляет около 9000 К.

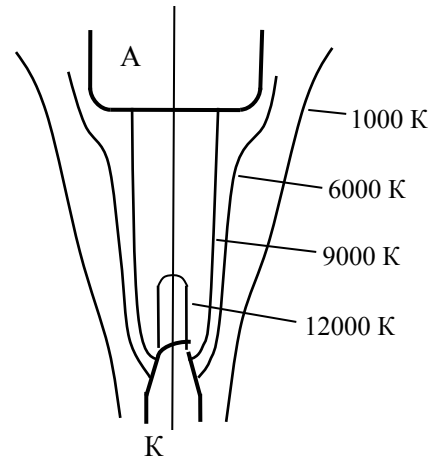


Рис.5

В данном примере положительный столб характеризуется достаточно высокой температурой $T \sim 9000$ К. Это свидетельствует в пользу термической ионизации в данной области. При этом для оценок концентрации плазмы обычно используется уравнение Саха, в предположении условия равновесности плазмы. Для расчета радиального и осевого распределения температуры плазмы $T(r, x)$ обычно используется уравнение Эленбааса-Геллера для случая цилиндрического столба плазмы.

$$-\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (rJ) + \sigma(r) E^2 = 0 \qquad J = -\lambda \frac{dT}{dr}$$

Первое слагаемое уравнения содержит поток тепла из плазмы в радиальном направлении $J(x)$, а второе связано с выделением джоулева тепла в плазме.

Анодная область дугового разряда связана с высокими излучательными характеристиками. Различаются два режима работы разряда: с диффузионной привязкой к аноду и с образованием анодных пятен. При диффузионной привязке ток на аноде занимает большую площадь и его плотность составляет $j \sim 10^2$ А/см². Эрозия материала при этом незначительная. Режим с анодными пятнами возникает при малой площади анода и характеризуется вольтамперной зависимостью, отличной от режима с диффузионной привязкой. В угольной дуге при токе порядка $I=10-20$ А начинается процесс образования анодных пятен с плотностью тока, достигающей $j=(1-5) \cdot 10^4$ А/см². Из пятен происходит сильное истечение раскаленного материала при температуре порядка $T=3000-4000$ К, а яркость поверхности кратера составляет до $P=1-10$ кВт/см². Для ряда дуг около 60-70 % световой мощности излучается анодом. Это свойство нашло широкое применение для создания мощных дуговых источников света.