

Что касается широко используемых в автотракторном электрооборудовании постоянных магнитов – ферритов, изготавливаемых методом порошковой металлургии из смеси измельченных окислов железа ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) и стронция ( $\text{SrO}$ ), то они вследствие относительно низкого уровня магнитной энергии ( $(BH)_{\text{max}}$  кДж/м<sup>3</sup>) и низких значений остаточной индукции не в состоянии обеспечить такой же уровень магнитных свойств индукторов, которым обладают индукторы генераторов с электромагнитным возбуждением, а следовательно, их применение в автотракторных генераторах следует считать нецелесообразным.

Более конкретные данные относительно целесообразности применения постоянных магнитов в автотракторных генераторах можно получить в результате совместного рассмотрения магнитных характеристик их индукторов и характеристик внешних к ним индукторов магнитной цепи.

### Литература

1. Грузков С.А., Останин С.Ю., Сугробов А.М., Сульдин А.В., Тыричев П.А. Магнитные материалы, монтажные и бортовые провода. – М.: Издательство МЭИ, 2005.
2. Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф. Электрические генераторы с постоянными магнитами. – М.: Энергоатомиздат, 1977.

### **Модель электродугового разряда для плазмотронов малой мощности**

д.ф-м.н. Владыко В.Б., к.т.н. Назаров А.В., к.т.н. доц. Еремин Б.Г., к.т.н. доц. Мартынов С.В.,  
к.т.н. доц. Андрух О.Н.  
МОУ «ИИФ», МГТУ «МАМИ»

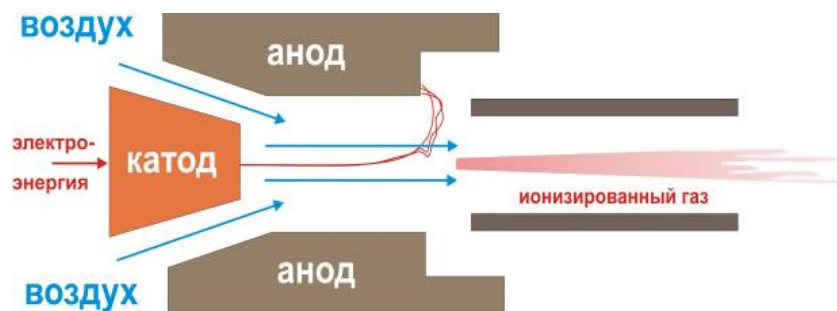
В настоящей статье рассмотрено развитие известной ранее модели на случай дугового разряда в потоке газа. Рассматривается традиционная геометрия дуговых плазмотронов, в которых стабилизация дуги осуществляется уступом.

Ключевые слова: плазма, электродуговой разряд, плазмотрон, математическая модель

Научно-исследовательская работа проводится в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

Эффективность дуговых плазменных генераторов малой мощности основывается на практически мгновенном нагреве плазмообразующего газа. Параметры газа полностью определяются геометрическими размерами разрядной области, током разряда и расходом плазмообразующего газа. В настоящее время имеются математические модели [1,2], позволяющие рассчитать температуру и вольтамперную характеристику столба дуги высокого давления, а в случае плазмотрона получены [3] эмпирические зависимости напряжения дуги от геометрических параметров, силы тока и расхода.

Далее приведено развитие модели [1] на случай дугового разряда в потоке газа. Рассматривается традиционная геометрия дуговых плазмотронов (рисунок 1), в которых стабилизация дуги осуществляется уступом.



**Рисунок 1 – Осевой плазмотрон с тангенциальным вводом плазмообразующего газа и ступенчатым анодом**

Основное падение потенциала происходит в столбе дуги. Соответственно и основная энергия выделяется там же. Плазма воздуха, молекулярных газов, паров металлов при давлениях  $p \geq 1 \text{ атм}$ , практически при любых токах бывает равновесной. Это обусловлено интенсивным обменом энергией между электронами и молекулами через возбуждение колебаний и вращений. При малых токах и атмосферном давлении неравновесной является плазма инертных газов. Температура в канале и концентрация электронов максимальны на оси канала. Но из-за чрезвычайно резкой зависимости равновесной степени ионизации от температуры,  $n_e \sim \exp(-I/2kT)$ , концентрация электронов спадает от оси неизмеримо быстрее, чем сама температура. Первейшей характеристикой равновесной плазмы является ее температура. Так электропроводность плазмы  $\gamma$  однозначным образом определяется ее температурой. На первый план выходит термическая ионизация. Ионизируют молекулы те электроны, которые получили достаточно энергии не от поля, а в столкновениях с другими частицами. Термическая ионизация происходит совершенно независимо от того, каким путем энергия поступает в плазму.

Для определения температуры, напряженности электрического поля, радиуса столба разряда рассмотрим длинный цилиндрический столб дуги внутри трубки радиуса  $R$ . Потери энергии на излучение учитывать не будем. Электрическое поле в дуге является потенциальным ( $\text{rot}\vec{E} = 0$ ), поэтому оно в однородном столбе постоянно по сечению. Удельная мощность источников тепла  $w = \gamma E^2$  определяется только распределением температуры через зависимость  $\gamma(T)$ . Баланс энергии плазмы описывается уравнением теплопроводности:

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

Граничные условия: при  $r = R$   $T = T_c$ ,  $T_c$  – температура стенки; при  $r = 0$   $dT/dr = 0$ . Сила тока разряда:

$$I_p = E \int_0^R \gamma 2\pi r dr \quad (2)$$

регулируется на опыте и потому является задаваемым параметром. Проводимость плазмы становится заметной при температурах  $T \approx 4000 - 6000 \text{ K}$  и быстро нарастает с увеличением  $T$ . Ток фактически протекает только в приосевой части. В широко известной каналовой модели дуги вводят радиус токопроводящего канала  $r_0$  и считают, что вне канала (при  $r > r_0$ )  $\gamma = 0$  и тока нет. Внутри канала (при  $0 < r < r_0$ ) проводимость высока  $\gamma_\kappa \equiv \gamma(T_\kappa)$  и соответствует температуре на оси  $T_\kappa \equiv T(0)$ . В этом приближении уравнение (2) приобретает следующий вид:

$$I_p = \gamma_\kappa E \pi r_0^2 \quad (3)$$

Интегрируя уравнение (1) в бестоковой зоне, получаем:

$$r\lambda \frac{dT}{dr} = C \quad (4)$$

Константа интегрирования  $C$  определяется мощностью:

$$W = \frac{I_p^2}{\pi r_0^2 \gamma_\kappa} \quad (5)$$

выделяющейся в единице длины столба.

Градиент температуры можно определить из следующего соотношения:

$$\frac{dT}{dr} = T \frac{\sqrt{\text{Re}}}{l}, \quad (6)$$

где:  $l/\sqrt{\text{Re}}$  – толщина пограничного слоя, окружающего дугу,

$$\text{Re} = \frac{Gl}{\pi\eta R^2},$$

$l$  – длина дуги, число Рейнольдса

$G$  – расход плазмообразующего газа,

$\eta$  – вязкость газа.

Уравнение (4) запишется следующим образом:

$$2\pi \frac{r_0}{l} \lambda T \sqrt{\text{Re}} = W \quad (7)$$

Уравнение (7) содержит две неизвестные величины  $T_\kappa$ ,  $r_0$ . Недостающее соотношение можно получить, рассмотрев баланс энергии в токопроводящем канале. При используемых токах степень ионизации плазмы невелика и ее проводимость определяется электронными столкновениями:

$$\gamma(T) = A \exp(-I/2kT) \quad (8)$$

Внутри канала температура плазмы также спадает по мере удаления от оси. Считая, что при  $r = r_0$ ,  $T = T_0$ , и предполагая, что  $\gamma(T_\kappa)/\gamma(T_0) = e$ , а также имея в виду, что  $I/2kT \gg 1$ , найдем:

$$\Delta T = T_\kappa - T_0 \approx (2kT_\kappa / I) T_\kappa \quad (9)$$

Считая, что выделяющаяся в канале мощность выносится через его границу тепловым потоком, можно приближенно считать:

$$W = 2\pi r_0 \lambda_\kappa \frac{\Delta T}{r_0} = 2\pi \lambda_\kappa \Delta T \quad (10)$$

Интегрирование уравнения (1) с допущением об однородности выделения тепла в канале уточняет (10), имеем:

$$W = 4\pi \lambda_\kappa \Delta T \quad (11)$$

С учетом (9) уравнение (11) приведем к виду:

$$W = 8\pi \lambda_\kappa k T_\kappa^2 / I \quad (12)$$

Для упрощения формул будем считать  $\lambda = \lambda_\kappa$ , тогда уравнение (7) перепишем следующим образом:

$$2\pi \frac{r_0}{l} \lambda_\kappa T_\kappa \sqrt{\text{Re}} = 8\pi \lambda_\kappa k T_\kappa^2 / I \quad (13)$$

Из (13) найдем:

$$T_\kappa = \frac{I r_0}{4kl} \sqrt{\text{Re}} \quad (14)$$

Подставляя (14) в (8), находим проводимость канала:

$$\gamma_\kappa = A \exp\left\{-\frac{4l}{r_0 \sqrt{\text{Re}}}\right\} \quad (15)$$

С учетом (5) и (14), (15) уравнение (7) преобразуется к виду:

$$2\pi \frac{r_0}{l} \lambda \frac{I r_0}{4kl} \text{Re} = \frac{I_p^2}{\pi r_0^2 A} e^{\frac{4l}{r_0 \sqrt{\text{Re}}}} \quad (16)$$

Из (16) получим:

$$r_0^4 = \frac{2I_p^2 k l^2}{\pi^2 A l \lambda \text{Re}} e^{\frac{4l}{r_0 \sqrt{\text{Re}}}} \quad (17)$$

Радиус канала определим из (17), используя метод простой итерации:

$$r_{n+1} = \left( \frac{2I_p^2 k l^2}{\pi^2 A l \lambda \text{Re}} e^{\frac{4l}{r_n \sqrt{\text{Re}}}} \right)^{1/4} \quad (18)$$

После определения радиуса канала легко определяется температура канала из уравнения (14) и напряженность электрического поля в канале:

$$E = \frac{I_p}{\pi \gamma_k r_0^2} \quad (19)$$

Формулы (14), (18) и (19) определяют основные свойства столба дуги при температурах  $T_k \approx 8000 - 14000 \text{ K}$ . В этом диапазоне температур принято использовать следующие эффективные значения “потенциала ионизации”  $I = 6,2 \text{ эВ}$  и константы  $A = 83 \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$ , коэффициенты теплопроводности и вязкости задавались следующими значениями  $\lambda = 2,3 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

Результаты расчетов по предлагаемой модели сопоставлялись с данными экспериментальных исследований плазмотронов, проведенных на стенде, и сравнивались с расчетами по эмпирической формуле, предложенной в работе [3].

Установлено, что результаты расчетов по предлагаемой модели с точностью до 10 % совпадают с экспериментальными данными, а эмпирическая формула в работе [3], дает значительную ошибку при токах меньше 3 А, это объясняется тем, что при ее получении использовались экспериментальные данные, полученные при испытаниях плазмотронов, работающих с токами от 2 до 30А.

Таким образом, предлагаемая модель позволяет производить оценочные расчеты параметров плазмотронов, особенно представляют интерес малые токи (менее 2 А) с точки зрения использования плазмотронов малой мощности.

#### Литература

1. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. - М.: Наука, 1987.
2. Энгель А., Штеенбек М. Физика и техника электрического разряда в газах, т.2: Пер. с нем. Под ред. Капцова Н.А. — М.; Л.: ОНТИ, 1936.
3. Романовский Г.Ф., Матвеев И.Б., Сербин С.И. Результаты экспериментальных исследований плазмотронов малой мощности. Труды Николаевского кораблестроительного института. Судовое машиностроение. Вып. 194, 1982. с.4-9.

#### **Методика проектирования основных компонентов систем электроснабжения и пуска автотранспортных средств, учитывающая реальные условия эксплуатации, события и алгоритм**

к.т.н. доц. Акимов А.В., к.т.н. Чернов А.Е.  
 МГТУ «МАМИ»  
 (495) 365-54-98, alexzander\_66@mail.ru

*Аннотация.* Статья посвящена методике проектирования генераторных установок, аккумуляторных батарей и стартерных электродвигателей автотранспортных