УДК 621.791

О ТЕРМИЧЕСКОЙ ИОНИЗАЦИИ И ТЕМПЕРАТУРЕ СВАРОЧНОЙ ДУГИ

А. И. ЛЯПИН
Белорусско-Российский университет
Могилев, Беларусь

UDC 621.791

ON THERMAL IONIZATION AND WELDING ARC TEMPERATURE

A. I. LYAPIN

Аннотация. Проведено сравнение оригинальной и упрощенной формул Сага для термической ионизации газа. Показано, что применимость упрощенной формулы ограничена определенными значениями параметров. Также показано, что термическая ионизация не может являться основным процессом генерации свободных носителей электрического заряда в дуге. Экспериментально получено, что равновесная температура дуги в воздухе между вольфрамовым и угольным электродами при токе 100 А не может превышать 3660 К.

Ключевые слова: сварочная дуга, термическая ионизация, степень ионизации, упрощенная формула Сага, равновесная температура дуги.

Abstract. The original and simplified Saga formulas for thermal ionization of gas are compared. It is shown that the applicability of the simplified formula is limited by certain parameter values. It is also shown that thermal ionization cannot be the main process of generation of free charge carriers in the arc. It has been experimentally obtained that the equilibrium temperature of the arc in air at a current of 100 A cannot exceed 3660 K.

Keywords: welding arc, thermal ionization, degree of ionization, simplified Saga formula, arc equilibrium temperature.

О применимости упрощенной формулы Сага для термической ионизации к сварочной дуге. В работах по дуговому разряду [1, 2] и др. при обсуждении элементарных процессов генерации свободных носителей заряда рассматривается термическая ионизация и приводится известная формула Сага для степени ионизации газа α:

$$\frac{\alpha^2}{1-\alpha^2} = 2{,}4 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{1}{p} \cdot T^{2{,}5} \cdot \exp\left(-\frac{e \cdot U_i}{k \cdot T}\right), \qquad (1)$$

где p – давление газа, мм рт. ст.; T – абсолютная температура; e – заряд электрона; U_i – эффективный потенциал ионизации молекул газа; k – постоянная Больцмана.

Затем, пренебрегая в знаменателе величиной α^2 относительно единицы, формула (1) записывается в следующем виде:

$$\alpha^2 = 2,4 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{1}{p} \cdot T^{2,5} \cdot \exp\left(-\frac{e \cdot U_i}{k \cdot T}\right). \qquad (2)$$

Из упрощенной формулы (2) получается выражение для степени термической ионизации газа в дуге:

$$\alpha = 1,55 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{1}{p^{0,5}} \cdot T^{1,25} \cdot \exp\left(-\frac{e \cdot U_i}{2 \cdot k \cdot T}\right). \qquad (3)$$

Очевидно, что оригинальная формула Сага (1) приводит к другому выражению для α. Действительно, правые части сравниваемых формул (1) и (2) одинаковые, обозначим их буквой *X*. Тогда из формулы (1) получим для степени ионизации

$$\alpha(1) = \sqrt{\frac{X}{1+X}}. \qquad (4)$$

В формуле (4) при любых значениях *X* (т. е. потенциала ионизации, давления и температуры) степень ионизации не превысит единицы.

Упрощенная же формула (2) приводит к следующему результату:

$$\alpha(2) = \sqrt{X}. \qquad (5)$$

Из (5) следует, что упрощенная формула (3) применима лишь в ограниченной области значений потенциала ионизации, давления и температуры, в которой α не превышает единицу.

Для наглядности ниже приведены результаты расчетов степени термической ионизации по формулам (1) и (2). Расчеты проведены для дуги, свободно горящей между стальными электродами при атмосферном давлении. В отсутствие каких-либо специфических примесей эффективный потенциал ионизации, входящий в формулы (1)–(3) практически равен потенциалу ионизации железа.

На рис. 1 показаны зависимости степени ионизации α(1), вычисленной по формуле (1), и α(2), вычисленной по формуле (2), от температуры газа.

При температурах до 5000 К значения степеней ионизации α(1) и α(2) отличаются незначительно. Поэтому график начинается с 5000 К.

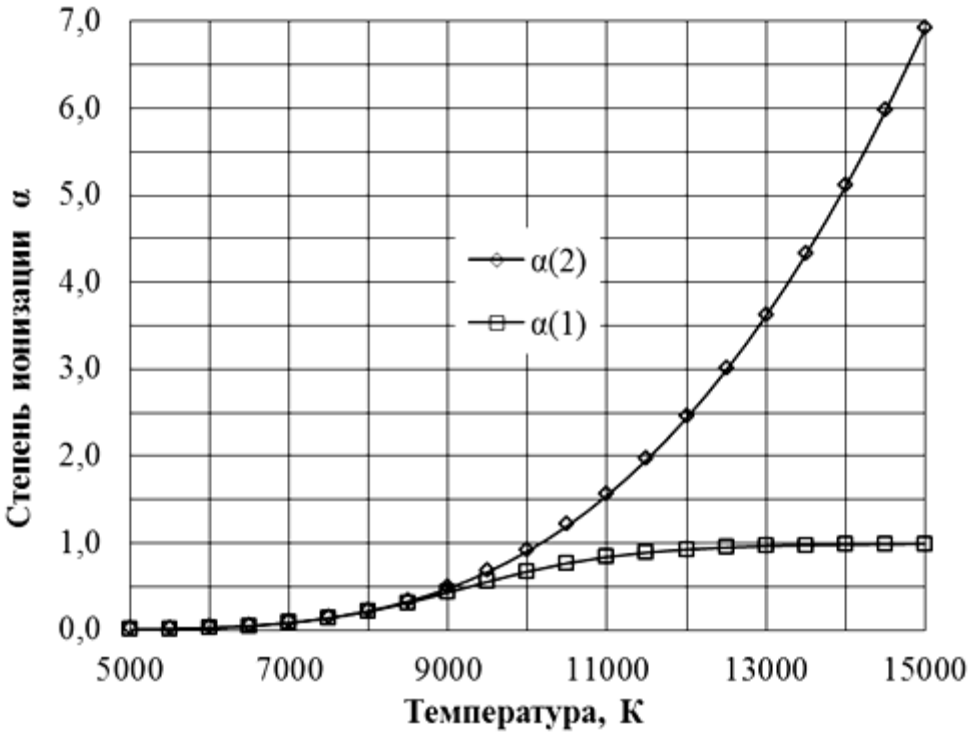

Рис. 1. Зависимости степеней ионизации α(1), вычисленной по формуле (1), и α(2), вычисленной по формуле (2), от температуры газа

Заметное расхождение (в сотых долях процента) в значениях α(1) и α(2) начинается с температуры 7000 К. При температуре 10180 К величина α(2) с точностью до третьего знака после запятой достигает единицы. Дальнейшие результаты расчетов теряют физический смысл, т. к. противоречат определению величины α.

Аналогичные расчеты были проведены для некоторых металлов. Верхние температурные границы $T_{гр}$ применимости упрощенной формулы Сага α(2) при различных давлениях приведены в табл. 1.

Табл. 1. Верхние температурные границы $T_{гр}$ применимости упрощенной формулы Сага α(2) при давлениях $10^5 \ldots 10^2$ Па

Металл	Al	Ti	Fe	Co	Ni	Cu	Mo	Ta
$1\cdot10^5$	8910	9590	10180	10110	9820	9810	9690	10590
$1\cdot10^4$	7245	7870	8450	8395	8155	8160	7985	8745
$1\cdot10^3$	6065	6635	7190	7145	6940	6955	6755	7410
$1\cdot10^2$	5195	5710	6240	6200	6020	6040	5835	6402

Таким образом, при расчетах степени термической ионизации α определенного газа с помощью упрощенной формулы Сага прежде необходимо определить допустимые значения давления и температуры, при которых α не превышает единицу.

О температуре дуги. Для оценки температуры дуги обычно используется хорошо известное выражение, полученное на основе упрощенной формулы Сага (3):

$$T = 800 \cdot U_i, \tag{6}$$

где U_i – эффективный потенциал ионизации.

Из приведенных выше металлов наибольшим потенциалом ионизации обладает железо U_i = 7,896 эВ. При этом значении U_i температура дуги T в парах железа при атмосферном давлении и степень ионизации α равны соответственно $T \approx 6320$ К, $\alpha \approx 3{,}5$ %. У остальных металлов эти величины будут ниже. В частности, для алюминия $T \approx 4780$ К, $\alpha \approx 1{,}6$ %. Трудно ожидать получение сварочных токов в сотни ампер и выше при такой степени ионизации. Это может означать, что термическая ионизация не является основным процессом генерации свободных носителей электрического заряда в дуговом разряде.

Для грубой экспериментальной оценки температуры был проведен следующий опыт: в столб дуги, свободно горящей между *W* и *C* электродами при атмосферном давлении и токе 100 А, вводили отрезки стальной и вольфрамовой проволок диаметром 2,4 мм. Если первый образец начинал плавиться с первых секунд опыта, то второй не проявлял признаки плавления в течение десятков секунд, превышающих расчетное время плавления. Этот результат позволяет утверждать, что значение равновесной («тепловой») температуры дуги лежит в пределах температур плавления стали и вольфрама ($T_W \approx 3660$ К).

Выводы.

1. При расчетах степени термической ионизации α конкретного газа с помощью упрощенной формулы Сага необходимо прежде определить допустимые значения давления и температуры, при которых α не превышает единицу.

2. Термическая ионизация не может являться основным процессом генерации свободных носителей электрического заряда в дуговом разряде.

3. Значение равновесной («тепловой») температуры дуги, горящей между вольфрамовым и угольным электродами при атмосферном давлении и токе 100 А, лежит в пределах температур плавления стали и вольфрама ($T_W \approx 3660$ К).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лесков, Г. И.** Электрическая сварочная дуга / Г. И. Лесков. – Москва: Машиностроение, 1970. – 336 с.

2. **Грановский, В. Л.** Электрический ток в газе. Установившийся ток / В. Л. Грановский. – Москва: Наука, 1971. – 526 с.