

УДК 537.52

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОПЛАЗМЕННОГО НАГРЕВА ВОЗДУХА В ВЫСОКОЧАСТОТНОМ ФАКЕЛЬНОМ РАЗРЯДЕ

Вл. Л. ТЕПЛОУХОВ, Г. Н. КОЛПАКОВ, Вик. Л. ТЕПЛОУХОВ,  
В. П. ДРЯМОВ, В. А. ВЕРНЯЕВ

(Представлена научным семинаром физико-технического факультета)

Рассматривается эффективность нагрева воздуха в высокочастотных плазмотронах факельного типа. Для этого оцениваются потери энергии на различных участках в цепи источник питания — плазмотрон. Наряду с калориметрическим методом предложена методика измерения мощности разряда по электрическим параметрам, характеризующим работу высокочастотного генератора. Показано, что общий к.п.д. в. ч. факельного плазмотрона может достигать 0,7—0,8.

Иллюстраций 3, таблиц 2, библиографий 5.

Важными вопросами совершенствования технологии неорганических соединений является интенсификация, сокращение стадийности процессов, более полное использование сырья и дорогостоящих реагентов, автоматизация процессов. В этом плане большой интерес вызывают плазмохимические процессы, позволяющие сочетать интенсификацию процессов, их непрерывность с возможностью построения более простых технологических схем.

Проводимые нами исследования различных плазмохимических процессов с использованием в. ч. индукционного и факельного разрядов позволили накопить определенный опыт по их эксплуатации. Лучше освоены и чаще применяются в. ч. плазмотроны индукционного типа, но поскольку кварцевые разрядники обладают низкой механической и химической стойкостью, то они не могут быть использованы для работы с токсичными средами. В связи с этим нами разработаны плазмотроны с использованием в. ч. факельного разряда [1, 2], на основе которых созданы плазмохимические реакторы как для гомогенных, так и гетерогенных процессов.

Эксплуатация в. ч. плазмотронов факельного типа показала, что в процессе их работы обеспечивается высокая чистота газоразрядной плазмы и практически неограниченный ресурс работы. Значительно больший по сравнению с электрической дугой пространственный объем в. ч. факельного разряда позволяет обеспечивать хороший тепло- и массообмен между газовым разрядом и плазмообразующим газом, а также обеспечивает эффективный нагрев твердых частиц.

Плазменная струя в дуговом плазмотроне проходит срез сопла со звуковой или сверхзвуковой скоростью. В этом случае достигается высокий (0,7 ÷ 0,8) к. п. д. дуговых плазмотронов. Плазмотроны же с ламинарной плазменной струей не представляют интерес из-за низкого к. п. д. При подаче твердых частиц в плазменную струю дуговых плазмотронов время контакта составляет  $10^{-2} \div 10^{-3}$  сек [3]; вследствие

этого эффективность нагрева твердых частиц невелика. По данным авторов [3] к. п. д. нагрева твердых частиц составляет  $1 \div 3\%$ .

При в. ч. электроплазменном нагреве плазменная струя движется зачастую с дозвуковыми скоростями, которые можно менять в широких

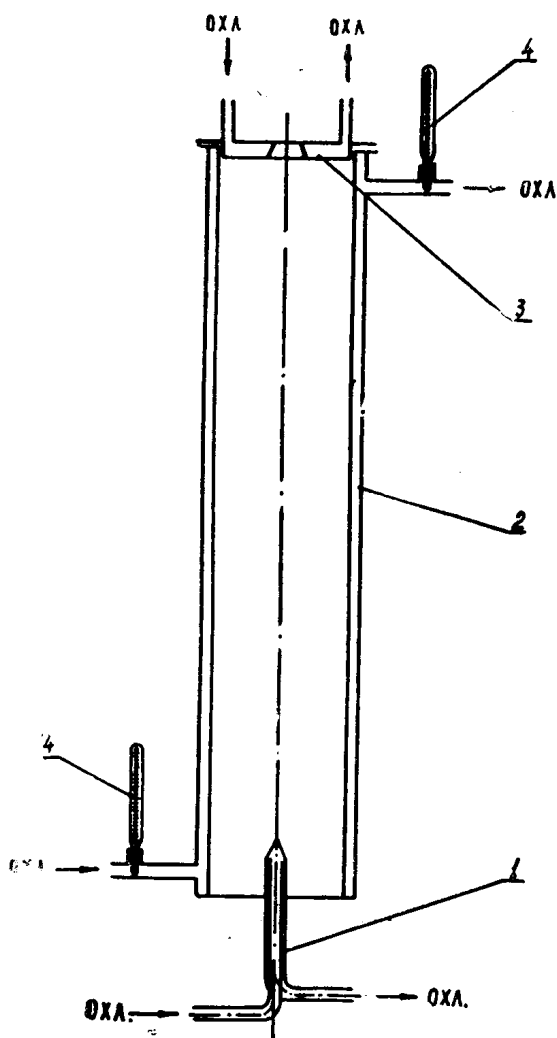


Рис. 1. Схема калориметрирования в. ч. факельного разряда: 1 — электрод; 2, 3 — медный калориметр; 4 — термометры.

высокочастотной мощности в разряд, поэтому нами к. п. д. работы лампового генератора определялся по методике, предложенной в работе [4]. Предварительно эта методика была проверена калориметрическим методом на вышеуказанной конструкции. Эффективность же нагрева оценивалась для свободного (невозмущенного стенками) в. ч. факельного разряда.

Методика измерения калориметрической мощности состояла в следующем. Мощность, потребляемая из сети, измеряли трехфазным киловаттметром (класс 1,5). Мощность от выпрямителя  $P_0$  измеряли амперметром типа М-1108 (класс 0,2) и киловольтметром С-96 (класс 1,5). Мощность, рассеиваемая на аноде, определялась калориметрированием, мощность плазменной струи и излучения плазмы  $P_a$  также определяли калориметрированием.

пределах с сохранением общего высокого к. п. д. в. ч. плазмотрона (индукционного или факельного). Время контакта твердых частиц с плазменной струей может быть увеличено на один—два порядка, т. е.  $1,0—0,1$  сек, соответственно эффективность нагрева твердых частиц увеличивается до  $20—30\%$  [3]. Однако часто вызывает сомнение эффективность использования в. ч. факельных плазмотронов. Поэтому нами проведены исследования с целью определения к. п. д. преобразования электрической энергии в тепловую.

Исследования проведены на генераторе типа ЛД4-10, переоборудованного специально на такую нагрузку. Генератор работает в диапазоне частот  $37 \div 40$  мГц. В качестве плазмообразующего газа использовался воздух.

Конструкция в. ч. плазмотрона факельного типа (рис. 1) представляла водоохлаждаемый электрод 1, помещенный в водоохлаждаемый секционный медный калориметр 2. Это позволяло снимать величину тепловой мощности на различных участках в. ч. факельного разряда. Естественно, что такая конструкция не могла обеспечить оптимальный ввод

С другой стороны, калориметрические измерения мощности, рассеиваемой на аноде, дублировались измерениями к. п. д. лампового генератора по его электрическим характеристикам. Для этого измеряли значения постоянных составляющих анодного  $I_0$  и сеточного  $I_{oc}$  токов, напряжение питания генераторной лампы  $E_a$  и колебательное напряжение  $U_k$ . Принцип расчета к. п. д. ( $\eta$ ) лампового генератора по его рабочим параметрам основан на классической квазилинейной теории лампового генератора и изложен в работах [4, 5].

Согласно этой методике  $\eta$  — к. п. д. лампового генератора, характеризующего потери мощности на аноде, вычисляется по известной формуле

$$\eta = 0,5 \cdot \gamma \cdot \xi, \quad (1)$$

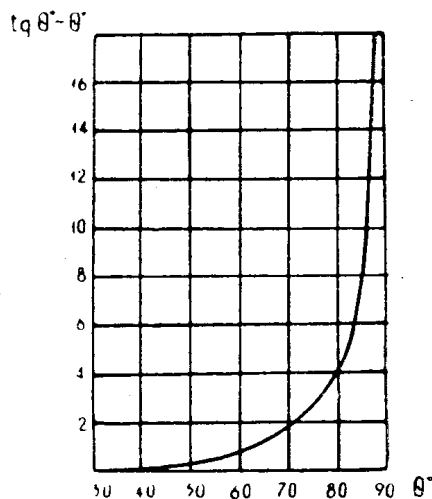


Рис. 2. Определение угла отсечки анодного тока автогенератора.

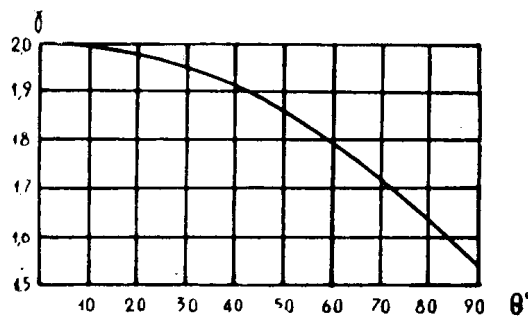


Рис. 3. Зависимость коэффициента формы кривой анодного тока от угла отсечки.

где  $\gamma$  — коэффициент формы кривой анодного тока;  $\xi$  — коэффициент использования анодного напряжения, равный отношению  $\frac{U_k}{E_a}$ ;

Коэффициент формы кривой анодного тока определяется по зависимости, представленной на рис. 2, где  $\Theta$  — угол отсечки, определяемый по формуле 2 и графику на рис. 3.

$$\operatorname{tg} \Theta - \Theta = -\frac{\pi}{S} \left( \frac{I_0}{I_{oc} R_c - E_{oc} + D E_a} \right). \quad (2)$$

Здесь  $S$  — статическая крутизна характеристики генераторной лампы;  $D$  — проницаемость сетки;  $R_c$  — сопротивление в цепи сетки;  $I_0$  — анодный постоянный ток;  $I_{oc}$  — сеточный постоянный ток.

В процессе экспериментов в. ч. генератор ЛД4-10 эксплуатировался с 50%-ным анодным напряжением (3 кВ). Мощность в. ч. разряда изменялась незначительно, калориметрирование проводили как свободного в. ч. факельного разряда, так и при осевом продуве воздуха.

В табл. 1 представлены результаты измерений параметров в. ч. генератора и тепловой мощности разряда в калориметре.

Из полученных данных следует, что результаты калориметрических измерений находятся в хорошем согласии с результатами электрических измерений. Кроме того, анализ показывает, что к. п. д. ( $\eta_{a-v}$ ) выпрямитель-плазмотрон может быть повышен за счет увеличения коэффициента использования анодного напряжения  $\xi$ , который в наших измерениях соответствовал значениям  $0,135 \div 0,258$ . Пути повышения значений  $\xi$  возможны за счет разработки специальных конструкций в. ч.

факельных плазмотронов продува газа и использования специальных схем в. ч. генераторов.

Таблица 1

№	$I_{0c}$	$I_0$	$E_a$	$U_k$	$P_a^k$	$P_b$	Расход газа	$\eta_{a-b}^k$	$\eta_{a-b}^g$
п.п.	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>кв</i>	<i>в</i>	<i>квт</i>	<i>квт</i>	<i>м³/час</i>	%	%
1	0,25	2,8	3,1	550	1,17	8,67	—	12,9	13,6
2	0,40	3,3	3,1	500	1,19	10,25	—	11,6	13,2
3	0,45	3,4	3,1	620	1,19	1,055	—	11,4	15,1
4	0,55	3,7	3,1	420	1,30	11,40	—	11,4	14,6
5	0,70	3,9	3,1	730	1,27	12,0	1,2	11,4	13,8
6	0,75	3,9	3,1	800	1,56	12,0	2,1	13,1	15,7

В подтверждение этого приведем значения  $\eta_{a-b}^g$  при измерении свободного в. ч. факельного разряда (табл. 2).

Таблица 2

№	$I_{0c}$	$I_a$	$E_a$	$U_k$	$P_b$	$\eta_{a-b}^g$	$P_a$	
п.п.	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>кв</i>	<i>кв</i>	<i>квт</i>	%	<i>квт</i>	Примечание
1	0,95	3,6	3,0	1,55	10,8	42,7	4,60	для лампы ГУ45А $D = 0,05$ $S = 23 \cdot 10^{-3} \text{ а/в}$ $R_c = 830 \text{ см}$
2	0,90	3,6	3,0	1,57	10,8	42,5	4,58	
3	0,90	3,0	3,0	1,65	9,0	46,2	4,16	
Продув в кварцевой трубе $\varnothing 50$ , расход воздуха 2,1 м³/час								
4	0,90	3,2	3,0	2,2	9,6	61,7	5,93	

Эти результаты свидетельствуют о достаточно высоком к. п. д. преобразования подведенной к выпрямителю мощности в мощность, выделяемую в в. ч. факельном разряде.

Существенное повышение к. п. д. в этом случае по сравнению с результатами табл. 1 происходит за счет увеличения  $\xi = \frac{U_a}{E_a}$ , которое было повышено до значений 0,51 ÷ 0,55.

Полный анализ потерь мощности, подведенной к в. ч. генератору, проводить нет необходимости, так как это проведено в работе авторов [3]. Согласно их данным общий к. п. д. для в. ч. индукционного плазмотрона, источником питания которого является тот же тип в. ч. генераторов, может быть представлен

$$\eta_0 = \eta_n \cdot \eta_T \cdot \eta_B \cdot \eta_a \cdot \eta_k;$$

где  $\eta_n = \frac{P - P_n}{P}$  — к. п. д., учитывающий потери мощности  $P_n$  на накал;

$\eta_T = P_B/P_T$  — к. п. д. анодного трансформатора;  
 $\eta_B = P_O/P_B$  — к. п. д. высоковольтного выпрямителя;  
 $\eta_a = P_a/P_O$  — к. п. д. по анодной цепи;  
 $\eta_k = P_n/P_a$  — колебательная система-плазма.

Согласно работе авторов [3],  $\eta_n = 0,910 \div 0,965$ ,  $\eta_T = 0,915 \div 0,975$ ,  $\eta_B = 0,995$ ; по полученным нами данным для в. ч. факельного разряда  $\eta_{a-b} = \eta_a \cdot \eta_k = 0,50 \div 0,61$ . Тогда общий к. п. д. в. ч. плазмотрона факельного типа, который может быть реализован в наших экспериментах, составляет

$$\eta_o = 0,42 \div 0,58.$$

По-видимому, максимально возможные к. п. д. в. ч. факельного плазмотрона по величине будут сравнимы с максимально возможными к. п. д. индукционных плазмотронов, т. е. достигать значений  $0,7 \div 0,8$  [3]. Это увеличение к. п. д. может быть достигнуто за счет работы в. ч. генераторов в режиме с  $\xi = 0,7$ ;  $\Theta = 50 \div 60^\circ$ .

Следует также отметить, что потери тепловой мощности в водоохлаждаемом электроде составляли в наших опытах  $6 \div 10\%$  от общей тепловой мощности плазмотрона.

Таким образом, высокочастотные плазмотроны факельного типа являются эффективными нагревателями воздуха. Кроме того, они могут использоваться для нагрева и других технологических газов и их смесей. Среднемассовая температура плазменных воздушных струй таких плазмотронов по нашим оценкам может достигать  $3500 \div 4000^\circ\text{K}$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И. А. Тихомиров, В. Л. Теплоухов, Г. Н. Колпаков. Труды III Всесоюзной конференции по генераторам низкотемпературной плазмы. Минск, 1967.
2. А. А. Воробьев, И. А. Тихомиров, А. И. Карелин, В. Л. Теплоухов, Г. Н. Колпаков, Г. П. Хандорин. Авторское свидетельство № 252300 с приоритетом от 10/VI-1968.
3. Л. М. Сорокин, И. Д. Кулагин, Н. Н. Рыкалин. Труды III Всесоюзной конференции по генераторам низкотемпературной плазмы. Минск, 1967.
4. И. В. Егоров. Электротермия. 1970, 92, стр. 10.
5. С. В. Персон, А. И. Лебедев-Карманов, В. Я. Хацкелевич. Теория и расчет амплитудно-модулированных ламповых генераторов. Изд-во «Сов. радио», М., 1955.