

О РЕСУРСЕ РАБОТЫ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ФАКЕЛЬНЫХ ПЛАЗМОТРОНОВ

И. А. ТИХОМИРОВ, В. Л. ТЕПЛОУХОВ, Вик. Л. ТЕПЛОУХОВ,
В. А. ВЕРНЯЕВ, С. М. ГОГЛЕВ, В. М. СТАРОВЕРОВ

(Представлена научным семинаром физико-технического факультета)

Как сообщалось ранее [1], низкотемпературная плазма и плазменные струи высокочастотного (в. ч.) факельного разряда используются нами при реализации ряда плазмохимических процессов. Для этой цели разработаны конструкции в. ч. факельных плазмотронов и накоплен определенный опыт по их эксплуатации.

Принципиально высокочастотный факельный плазмотрон представляет собой коаксиальную линию, передающую электромагнитную энергию от в. ч. генератора, внутренний проводник которой заканчивается водоохлаждаемым электродом. С электрода возбуждается одноэлектродный в. ч. факельный разряд [2].

Газоразрядная зона выполняется обычно в виде сопла, стенки которого обеспечиваются водяным охлаждением. Высоковольтный электрод вакуумно-плотно отделяется от внешнего проводника изолятором из керамики или тефлона, который одновременно отделяет газоразрядную зону от фидерной линии. Плазмообразующий газ подается аксиально или тангенциально, обеспечивает осевую устойчивость потоку плазмы, приводит к образованию защитного газового потока в пристеночной области.

Исследования высокочастотных плазмотронов факельного типа небольшой (до 60 кВт) мощности, предназначенных для проведения как гомогенных, так и гетерогенных реакций, показали, что они обеспечивают высокую чистоту газоразрядного пространства, обладают практически неограниченным сроком службы, механической прочностью и герметичностью (что необходимо при работе с агрессивными средами), небольшими габаритными размерами по сравнению с обычными химическими реакторами одной и той же производительности и могут быть использованы для переработки и синтеза различных химических соединений, в особенности для осуществления процессов термического разложения.

Однако вплоть до настоящего времени вопросам использования в. ч. факельного разряда уделялось очень мало внимания. У некоторой части исследователей даже бытует мнение о том, что вкладывание больших мощностей при высоком к.п.д. преобразования электрической энергии в тепловую в в. ч. факельном разряде — неосуществимая задача. Исследования, проведенные нами, показали, что общий к.п.д. такого типа плазмотронов может достигать 0,65—0,75.

Другим, не менее важным чем к.п.д. параметром, характеризующим работу плазмотронов, является срок службы (ресурс) аппарата.

Таблица 1

№ п.п.	Материал электрода	Режим работы в. ч. генератора		Характеристики разряда		Потери на электрод.	Мощность в разряде	Диаметр канала	Скорость испарения	Примеч.
		I_c, A	I_a, A	$U_{\sim}, B$	$I_{\sim}, A$					
Неохлаждаемые элементы										
1	Алюминий	0,45	2,2	950	1,2	0,350	1,10	0,2	0,42	$\varnothing 10 \text{ мм}$
2	Медь	0,53	2,4	1200	1,1	0,33	1,60	0,2	1,78	
3	Сталь 3	0,6	2,5	1100	1,0	0,35	1,45	0,2	1,58	
4	Сталь	0,5	2,3	1100	1,1	0,34	1,53	0,2	0,51	
5	Вольфрам	0,6	2,15	950	1,4	0,3	1,60	—	1,37	
Водоохлаждаемые электроды										
6	Медь ст. X18H9T	0,55	2,8	—	—	0,37	1,65	0,15	$5 \cdot 10^{-7}$	толщина стенки $\delta=3 \div 4 \text{ мм}$
7		0,45	2,7	—	—	0,43	1,57	0,15	10^{-5}	

Для определения ресурсов работы в. ч. факельных плазмотронов проведены исследования по разрушению как водоохлаждаемых, так и не водоохлаждаемых электродов, изготовленных из стали 3, стали X18H9T, меди, вольфрама. Исследования проведены для свободного в. ч. факельного разряда на воздухе с использованием в. ч. генератора ЛД4-10 с колебательной мощностью 10 кВт и частотой 39—40 мГц. Генератор эксплуатировался в режиме с 50% анодным напряжением. Методика экспериментов заключалась в определении скорости разрушения электродов при различных режимах работы в. ч. генератора. Результаты измерений представлены в табл. 1.

Полученные данные свидетельствуют о том, что в. ч. факельный разряд устойчиво существует с электродов из различных металлов. Потери мощности на электродах в наших экспериментах составляли $300 \div 350$ Вт, размеры приэлектродного пятна, определяемые с помощью фотосъемки канала разряда и по характерному отпечатку на неохлаждаемом электроде, составляли 0,15—0,20 см.

На основании этого нетрудно оценить среднюю плотность теплового потока в пятне, которая составляла $(1,0—2,0) \cdot 10^8$ Вт/м².

Плотность электрического тока в пятне составляла 30—110 А/см². Следовательно, тепловые потоки на электрод в в. ч. факельном плазмотроне могут быть сняты обычным водяным охлаждением [3]. Кроме того, природа в. ч. факельного разряда определяет постоянное перемещение приэлектродного пятна по поверхности электрода (даже в случае разряда с раскаленного электрода). Это приводит к перераспределению теплового потока по всей торцевой поверхности электрода и соответственно облегчает теплосъем с его поверхности.

С повышением мощности разряда увеличивается и тепловой поток на электрод. Это, в свою очередь, может привести к более интенсивной эрозии электрода. Поэтому нами проведены исследования по измерению плотности теплового потока в пятне и скорости эрозии электрода при мощностях в разряде 1,5 кВт, 10—12 кВт. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

№ п.п.	Диаметр пятна	Потери мощности на электроде	Плотность тепло- вого потока в пятне	Тепловая мощность разряда
	см ²	кВт	Вт/см ²	кВт
1	0,15—0,20	0,3—0,4	$(1,0—2,0) \cdot 10^4$	1,6
2	0,30—0,35	1,8—1,9	$(2,5—2,6) \cdot 10^4$	10,6

Полученные данные свидетельствуют об увеличении диаметра канала с повышением его мощности, при этом плотность теплового потока в пятне практически не изменяется. Следовательно, при достаточном охлаждении электрода скорость разрушения электродов в мощных в. ч. факельных плазмотронах должна оставаться постоянной.

Обращает на себя внимание тот факт, что режим горения разряда с «горячих» электродов незначительно отличается от режима разряда с водоохлаждаемых электродов. Это свидетельствует о том, что приэлектродные процессы не являются определяющими при поддержании в. ч. факельного разряда, или, по крайней мере, явление автоэлектронной эмиссии преобладает над термоэлектронной даже в случае вольфрамовых электродов. С целью подтверждения указанных положений прове-

дем оценочные расчеты приэлектродного падения напряжения, активно-го и емкостного сопротивления в слое.

Предположим, что тепловой поток на электрод определяется величиной тепловыделения в приэлектронной области. Кроме того, будем считать, что в приэлектронной области справедливо выражение для проводимости

$$\sigma = \sigma_a + j\sigma_r = \frac{ne^2}{m_e} \left(\frac{\nu}{\omega^2 + \nu^2} - j \frac{\omega}{\omega^2 + \nu^2} \right), \quad (1)$$

где для наших условий эффективная частота столкновений электронов с частицами плазмы ν много больше частоты ω питающего в. ч. поля ($\nu \gg \omega$). Тогда активная проводимость слоя σ_a должна быть много больше реактивной проводимости σ_r . На основании этого можно полагать

$$\Delta\varphi \approx I \cdot r \approx \frac{W_3}{I}, \quad (2)$$

где $\Delta\varphi$ — падение напряжения в приэлектродном слое;

r — сопротивление слоя;

I — общий ток через электрод.

Напряженность поля в приэлектродной области может быть определена как

$$E_3 \approx \frac{W_3}{I \cdot l_d \cdot a}, \quad (3)$$

где l_d — Дебаевский радиус для плазмы канала в. ч. факельного разряда, определяемый известным соотношением

$$l_d = \sqrt{\frac{\kappa (T_e \cdot T_i)}{4\pi n e^2 (T_e + T_i)}}, \quad (4)$$

где k — постоянная Больцмана;

T_e, T_i — соответственно электронная и ионная температура в канале разряда;

n — концентрация электронов в канале;

e — заряд электрона;

a — численный коэффициент.

Таблица 3

I	W_3	l_d	a	$\Delta\varphi$	E_3
a	$вт$	$см$	—	$в$	$в/см$
1—2	300—400	10^{-4} — 10^{-5}	2—6	$(1 \div 3) \cdot 10^2$	10^5 — 10^6

Численные значения величин сведены в табл. 3. Подобные значения величины напряженности поля в приэлектродном слое могут свидетельствовать о преобладающей роли процессов, определяемых автоэлектронной эмиссией. Термоэлектронная эмиссия же с водоохлаждаемого электрода, как известно, затруднена.

Таким образом, плотность теплового потока в приэлектродном пятне факельного разряда составляет 10^8 вт/м² и может быть снята обычным водяным охлаждением. Это существенно снижает роль термоэлектронной эмиссии и обуславливает существование разряда за счет

автоэлектронной эмиссии. Скорость эрозии водоохлаждаемых медных электродов составляет $\sim 5 \cdot 10^{-7}$ г/сек.

Полученные данные позволяют оценить ресурс работы τ в. ч. факельных плазмотронов в случае надежного охлаждения электродов

$$\tau = \Delta m / q,$$

где Δm — допустимая потеря в весе электрода;

q — скорость испарения ($5 \cdot 10^{-7}$ г/сек).

При $\Delta m = 0,7-0,8$ г ресурс работы τ может достигать значений 450—500 часов. Эксплуатация плазмотронов мощностью 20—40 кВт подтверждает расчетные данные.

В ряде технологических процессов могут быть использованы неохлаждаемые электроды. Ресурс работы такого типа плазмотрона также может достигать сотни часов.

В заключение следует добавить, что ресурс работы в. ч. плазмотронов определяет степень загрязнения твердых продуктов реакции материалом электродов. Так, при мощности в разряде 20—30 кВт, что обеспечивает переработку 5—10 кг продуктов в час, доля примесей электродных материалов составит $10^{-6}-10^{-7}\%$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Генераторы низкотемпературной плазмы. Сб. «Энергия», Минск, 1969.
2. Л. А. Столов. Ученые записки Казанского государственного университета. Вып. 2, т. 117, 1957.
3. А. С. Коротаев, А. М. Костылев, В. В. Коба, М. А. Ломовцев, В. А. Куцевалов, Б. В. Челознов. Генераторы низкотемпературной плазмы. М., «Наука», 1969.