

ЛИТЕРАТУРА

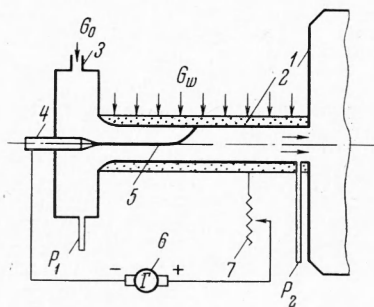
1. Меламед В. Г., Мухтарова Т. А., Полак Л. С., Хаит Ю. Л. Об одном методе расчета кинетических зависимостей химических реакций, протекающих в плазменных струях (на примере конверсии метана в ацетилен). Сб. «Кинетика и термодинамика химических реакций в низкотемпературной плазме», М., Изд-во «Наука», 1965, стр. 12.
2. Бухман Ф. А., Меламед В. Г., Полак Л. С., Хаит Ю. Л. Некоторые расчеты параметров принудительной закалки ацетилена при его получении из метана в плазменной струе. Сб. «Кинетика и термодинамика химических реакций в низкотемпературной плазме», М., Изд-во «Наука», 1965, стр. 52.
3. Хаит Ю. Л. Об одном возможном механизме закалки продуктов химических реакций в плазменной струе. Сб. «Кинетика и термодинамика химических реакций в низкотемпературной плазме», М., Изд-во «Наука», 1965, стр. 167.
4. Хаит Ю. Л. О кинетике химических реакций, протекающих в низкотемпературных плазменных струях. ПМТФ, 1965, № 4, стр. 54.
5. Яглом А. М. Введение в теорию стационарных случайных функций. Усп. матем. н., 1952, т. 7, № 5, стр. 3.
6. Пугачев В. С. Теория случайных функций. М., Физматгиз, 1960, стр. 316.
7. Хальд А. Математическая статистика с техническими приложениями. М., Изд-во иностр. лит., 1956, стр. 127.
8. Лебедев В. Л. Случайные процессы в электрических и механических системах. М., Физматгиз, 1958, стр. 124.
9. Давенпорт В. Б., Рут В. Л. Введение в теорию случайных сигналов и шумов. М., Изд-во иностр. лит., 1960, стр. 294.
10. Лившиц Н. А., Пугачев В. Н. Вероятностный анализ систем автоматического управления, т. 2, М., Изд-во «Сов. радио», 1963, стр. 14.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМОТРОНА С ПОРИСТЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ АНОДА

В. Н. Ярыгин

(Новосибирск)

Важной характеристикой плазменного подогревателя является коэффициент полезного действия, который принято определять как отношение мощности, затрачиваемой на увеличение теплосодержания нагреваемого газа, ко всей мощности, выделенной в дуговом столбе. Энергетические потери, составляющие нередко более половины выделенной мощности, в первую очередь,



Фиг. 1

объясняются необходимостью охлаждения электродов для предотвращения их разрушения. Исследования теплового баланса электрических дуг со стержневыми тугоплавкими катодами показали, что основная доля энергетических потерь приходится на анод. Например, для свободно горящей дуги в среде аргона суммарный тепловой поток в анод при токах 50—150 а составляет 75—90% от всей выделенной мощности [1]. При температурах газа $> 10000^\circ\text{K}$ источником дополнительных энергетических потерь может стать излучение [2].

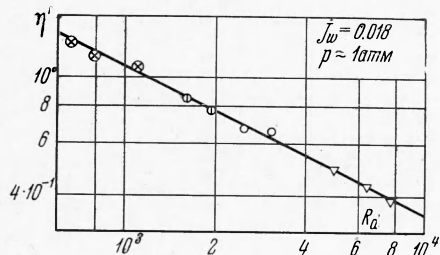
Одним из эффективных методов повышения к. п. д. электродуговых подогревателей может быть применение пористого охлаждения, являющегося разновидностью регенеративной схемы охлаждения. Этот метод находит все более широкое применение для защиты различных элементов аппаратов от действия высокотемпературного газового потока. Эффективность метода существенно зависит от относительного расхода охладителя через пористую стенку, а также от физических свойств охлаждающей среды и основного потока. Специфические особенности, имеющие место в электродуговом подогревателе, связаны с наличием очень высоких температур в опорных пятнах электрической дуги. Материал электродов должен обладать высокой термостойкостью, и, кроме того, эрозия материала под действием дуги не должна нарушать его проницаемости. Этим требованиям вполне удовлетворяет пористый графит.

U, e	I, a	$G_0, \text{g/сек}$	$\tilde{f}$	$p_2, \text{атм}$	η	$T, ^\circ\text{K}$	$R_d \cdot 10^{-4}$	$K \cdot 10^4$
39.5	16.3	0.40	0.018	0.96	0.48	1160	1.100	0.459
25.4	52.3	0.40	0.018	0.96	0.46	2030	0.795	0.846
22.6	87.2	0.40	0.018	0.96	0.43	2690	0.670	1.142
20.4	154.0	0.40	0.018	0.96	0.42	3980	0.521	1.790
28.2	51.5	0.80	0.0205	0.98	0.56	1380	1.960	0.550
26.0	85.3	0.80	0.0195	0.98	0.54	1920	1.610	0.779
24.0	149.0	0.80	0.0188	0.98	0.53	3120	1.200	1.320
23.0	16.0	1.31	0.0211	0.98	0.66	650	5.200	0.232
49.6	51.1	1.31	0.0208	0.98	0.62	1020	3.800	0.393
27.6	84.1	1.31	0.0195	0.98	0.60	1440	3.110	0.570
25.0	149.0	1.31	0.0168	0.98	0.59	2200	2.490	0.908
24.0	14.8	2.39	0.0220	0.98	0.75	560	11.000	0.194
55.5	49.1	2.35	0.0200	0.98	0.72	860	7.800	0.321
30.3	83.2	2.37	0.0165	0.98	0.70	1190	6.400	0.471
37.8	147.0	2.36	0.0135	0.98	0.67	1730	5.080	0.700
22.5	15.0	0.34	0.0700	0.091	0.65	1058	0.972	4.420
58.8	51.1	0.34	0.0692	0.112	0.63	1700	0.740	6.030
24.3	86.0	0.34	0.0670	0.126	0.62	2300	0.615	7.400
22.2	152.0	0.34	0.0645	0.145	0.59	3470	0.490	10.120
20.0	50.9	0.58	0.0480	0.97	0.60	1340	1.440	0.537
35.0	85.4	0.59	0.0440	0.97	0.57	1640	1.300	0.670
22.4	149.0	0.59	0.0370	0.97	0.55	2630	1.000	1.106
26.4	52.0	0.27	0.125	0.97	0.55	1190	0.715	0.475
21.8	87.2	0.26	0.126	0.97	0.54	1560	0.590	0.634
21.8	151.8	0.27	0.100	0.97	0.53	2820	0.439	1.192
20.6	51.2	0.80	0.0495	0.96	0.63	940	2.270	0.413
37.8	85.5	0.80	0.0424	0.96	0.62	1710	1.820	0.641
24.8	151.0	0.80	0.0329	0.96	0.59	2720	1.400	1.061
22.5	16.0	0.41	0.0665	0.99	0.61	830	1.370	0.307
48.0	51.4	0.41	0.0555	0.98	0.53	1420	0.975	0.566
24.2	85.8	0.41	0.0485	0.98	0.51	2000	0.805	0.817
28.4	51.9	0.42	0.0170	0.165	0.50	2300	0.620	5.660
24.0	86.5	0.42	0.0170	0.165	0.50	3100	0.435	7.860
20.4	153.0	0.42	0.0170	0.162	0.49	4430	0.348	12.250
26.2	52.1	0.40	0.0180	0.546	0.44	1970	0.637	1.440
22.6	87.0	0.40	0.0180	0.546	0.43	2660	0.501	1.990
20.0	152.0	0.40	0.0180	0.555	0.43	3910	0.367	2.920

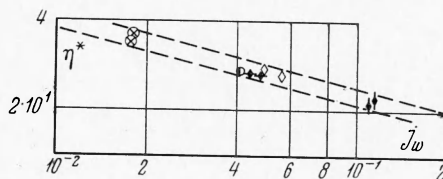
В последние годы начались исследования дуг с пористым охлаждением анода. Эксперименты со свободно горящими дугами проведены в работах [3-6], со стабилизированной дугой — в работе [7]. Эти исследования показали возможность и высокую эффективность пористого охлаждения электродов плазменных подогревателей.

Цель настоящей работы заключается в экспериментальном исследовании влияния пористого охлаждения анода на тепловую и вольт-амперную характеристики однокамерного плазмотрона с вихревой стабилизацией дуги в диапазоне давлений 1—0.1 атм.

1. Экспериментальная установка и методика измерений. Схема плазмотрона представлена на фиг. 1. Анод 2 изготовлен из пористого графита с внутренним диаметром 8 мм и относительной длиной $l/d = 10$. Пористость графита составляет приблизительно 25%, средний размер пор 17 мк. Катод 4 — водоохлаждаемый вольфрамовый стержень диаметром 5 мм с углом заостре-

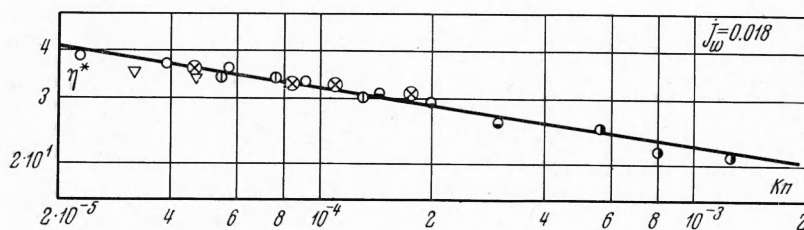


Фиг. 2



Фиг. 3

ния 60° . Плазматрон питался от генератора постоянного тока 6 через секционированный проволочный водоохлаждаемый реостат 7. Дуга инициировалась высоковольтным разрядом. Рабочий газ (аргон) подавался частью через вихревую камеру 3, частью — через пористый анод. Плазматрон соединялся с вакуумной камерой 1, минимальное давление в которой во время экспериментов достигало $1 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. Охлаждение анода, за исключением торцевых уплотнений, осуществлялось продуваемым через него газом. Торцевые уплотнения анода были выполнены водоохлаждаемыми. В процессе эксперимента измерялись ток и напряжение дуги, расходы газа через вихревую камеру G_0 и через анод G_w , расход и изменение температуры воды, охлаждающей катод и торцевые уплотнения анода, а также статические давления в вихревой камере p_1 и на срезе анода p_2 .

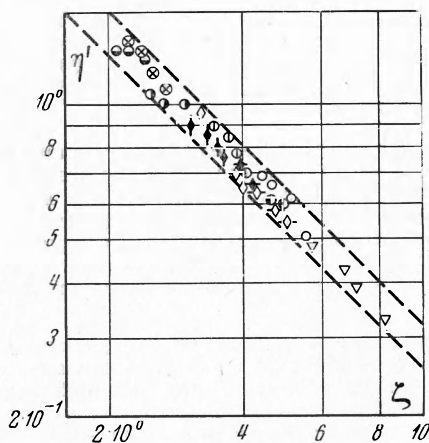


Фиг. 4

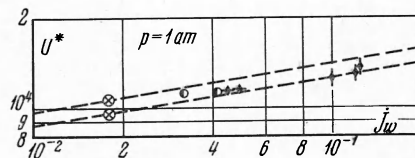
По измеренным в опытах величинам определялись тепловые потоки в электроды, среднемассовые энтальпии и температура газа в выходном сечении анода, к. п. д. подогревателя, а также относительная массовая скорость газа через поверхность анода $\tilde{j} = \rho W / \rho_0 W_0$. Излучение в тепловом балансе не принималось во внимание. Энтальпия струи плазмы измерялась также при помощи специально разработанного проточного калориметра. Это значение отличалось не более чем на 10% от энтальпии, определяемой по результатам калориметрирования тепловых потерь. Основные результаты измерений и расчетов представлены в таблице.

В экспериментах определялась также эрозия пористого графитового анода. За 9 ч работы плазматрона вес анода уменьшился на 0.065 г, причем наибольший унос материала происходил, по-видимому, в первоначальное время работы подогревателя при его запуске. Об этом свидетельствовало наличие ярко светящихся частиц в струе нагретого газа, которые исчезали через некоторое время после начала работы подогревателя. Видимо, причина этого заключается в тепловом ударе в первоначальный момент работы плазматрона.

2. Тепловая характеристика плазмат-



Фиг. 5



Фиг. 6

рона. Обобщение экспериментальных данных по к. п. д. проводилось по методике, изложенной в работе [8], где была получена структурная зависимость для к. п. д. при наличии ламинарного пограничного слоя на стенках канала. С учетом подвода вещества через поверхность анода эта зависимость может быть представлена следующим образом:

$$(1 - \eta) \eta^{-1} R_d^{1/2} P^{2/3} = f(l/d, \varepsilon, \tilde{j}), \quad (R_d = \rho_0 W_0 d / \mu) \quad (2.1)$$

Здесь R_d — критерий Рейнольдса, рассчитываемый по параметрам основного потока и среднемассовой выходной температуре. Зависимость $\mu(T)$ бралась из работы [9]; P — число Прандтля; ε — некоторый параметр, учитывающий явление пробоя; $\tilde{j}$ — относительная массовая скорость потока газа через стенку; l/d — относительная длина выходного электрода. Условимся в соответствии данных таблицы, отмеченных цифрами в крайней колонке справа, экспериментальным точкам на фиг. 2—7: цифре 1 — кружочки с крестиками, цифре 2 — кружочки с вертикальной черточкой, 4 — светлые треугольники, 5 — светлые ромбики с поперечными усиками, 6 — темные ромбики с поперечными усиками, 7 — то же с продольными усиками, 8 — кружочки с левой темной половиной, 9 — светлые ромбики, 10 — кружочки с правой темной половиной, 11 — кружочки с темной нижней половиной.

На фиг. 2 приведена зависимость функции к. п. д. от R_d для постоянного значения $\tilde{j} = 0.018$ при атмосферном давлении. В исследованном диапазоне чисел R_d $(1-\eta) \times \eta^{-1} \sim R_d^{-1/2}$. Эксперименты автора по исследованию влияния внутреннего диаметра анода на характеристики плазматрона позволили в качестве параметра, характеризующего условия пробоя, принять число Кнудсена $K = \Lambda/d$. Фиг. 4 иллюстрирует зависимость $\tilde{\eta} = (1-\eta)\eta^{-1} \sqrt{R_d}$ от числа K .

Влияние потока газа через поверхность анода показывает фиг. 3. Как видно, применение пористого охлаждения позволяет значительно уменьшить тепловую нагрузку анода.

На фиг. 5 приведена тепловая характеристика исследованного плазматрона. С точностью до $\pm 15\%$ эта зависимость в исследованном диапазоне параметров

$$R_d = (0.35-11.00)10^3$$

$$K = (0.23-12.25)10^{-4}$$

$$\tilde{j} = 0.014-0.125$$

может быть представлена выражением

$$(1-\eta)\eta^{-1} = 2.9 R_d^{-0.5} K^{-0.15} \tilde{j}^{-0.25} \quad (2.2)$$

3. Вольт-амперная характеристика плазматрона. На основании работ [8,10,11] обобщение вольт-амперных характеристик с учетом подвода охлаждаителя через поверхность анода производилось в виде

$$\frac{Ud}{I} = C \left(\frac{I^2}{G_0 d} \right)^m R_d^n \tilde{j}^p \quad (3.1)$$

Значения m и n оказались такими же, как в работе [8], т. е. -0.75 и -0.5 соответственно. Влияние пористого охлаждения анода на вольт-амперную характеристику подогревателя иллюстрирует фиг. 6, где представлена зависимость $\tilde{U} = Ud/I \times (I^2/G_0 d)^{0.75} R_d^{0.5}$ от $\tilde{j}$. Как следует из этого графика, подвод газа через поверхность анода вызывает рост сопротивления столба электрической дуги. На фиг. 7 приведена обобщенная вольт-амперная характеристика по экспериментам настоящей работы. С точностью до $\pm 15\%$ она описывается выражением

$$\frac{Ud}{I} = 1.8 \cdot 10^4 \left(\frac{I^2}{G_0 d} \right)^{-0.75} R_d^{-0.5} \tilde{j}^{0.13} \quad (3.2)$$

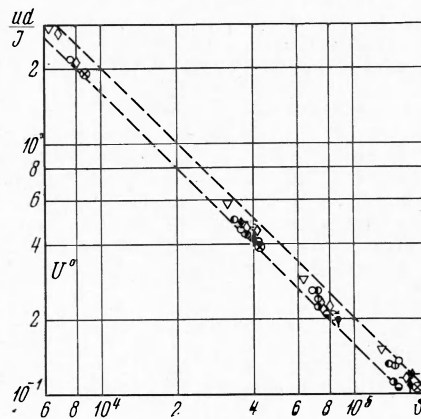
в диапазоне

$$I^2/G_0 d = (0.1-100)10^3, \quad R_d = (0.35-11.00)10^3, \quad \tilde{j} = 0.014-0.125$$

В заключение можно заметить, что, как видно из приведенных в таблице экспериментальных данных, максимальное значение к.п.д. составляет 75%. В данной работе не ставилась цель получить максимально возможные значения к. п. д., которые могут быть близкими к единице.

Кроме высоких значений к. п. д., подогреватель с пористым охлаждением электродов характеризуется относительно небольшой степенью загрязнения потока продуктами эрозии электродов.

Поступила 20 XI 1966



Фиг. 7

ЛИТЕРАТУРА

1. Schoek P. A. An Investigation of the Anode Energy Balance of High Intensity Arcs in Argon.— Modern Developments in Heat Transfer, N. Y., 1963.
2. Tankin P. S., Berry I. M. Experimental Investigation of Radiation from an Argon Plasma. Phys. Fluids, 1964, vol. 7, N 10.
3. Шир Ц., Кунн Дж. А., Ротакер Д. Л. Подвод газа через поверхность пористого анода электрической дуги. Ракетная техника и космонавтика, 1964, т. 2, № 3.
4. Schoek P. A., Eckert E. R. G. Experiments on the transpiration cooled anode of an electric arc. Proc. 1961 Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute. Stanford University Press, 1961.
5. Eckert E. R. G., Schoek P. A., Winter E. R. T. Thermische Untersuchung eines elektrischen Hochstromlichtbogens mit poröser, gasgekühlter Anode. Intern. J. Heat Mass Transfer, 1962, vol. 5, p. 292—305.
6. Кремерс Ц. Дж., Эккерт Е. Р. Г. Поле температур в дуге при пористом охлаждении анода. Ракетная техника и космонавтика, 1965, т. 3, № 10.
7. Кинни Р. Б., Сиэрроу Е. М., Уинтер Е. Р. Ф. Краткий обзор экспериментов с системой теплоотвода при пористом охлаждении электрической дуги. Теплопередача, 1964, т. 64, № 1.
8. Кутателадзе С. С., Ребров А. К., Ярыгин В. Н. О влиянии конвективного теплообмена на характеристики плазмотрона. ПМТФ, 1967, № 1.
9. Кулик П. П., Паневин И. Г., Хвесюк В. И. Теоретический расчет вязкости, теплопроводности и критерия Прандтля аргона при наличии ионизации. Теплофизика высоких температур, 1963, № 1.
10. Кутателадзе С. С., Ясько О. И. Обобщение характеристик электродуговых подогревателей. Инж.-физ. ж., 1964, т. 7, № 4.
11. Даутов Г. Ю., Жуков М. Ф. Некоторые обобщения исследований электрических дуг. ПМТФ, 1965, № 2.

НЕСТАЦИОНАРНЫЙ ЛУЧИСТЫЙ НАГРЕВ ТЕЛА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

А. Л. Бурка

(Новосибирск)

Рассматривается процесс нагрева цилиндра ($0 \leq r \leq R$, $0 \leq z \leq L$). верхнее основание которого подвергается лучистому нагреву, а на остальной части поверхности осуществляется теплообмен с окружающей средой по закону Ньютона.

Математическая постановка задачи записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} &= \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad \left(\begin{array}{l} 0 \leq r \leq R \\ 0 \leq z \leq L \end{array} \right), \quad \tau \geq 0 \\ \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=R} &= h [f(R, z, \tau) - T(R, z, \tau)], \quad \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=0} = h_1 [T(r, 0, \tau) - f(r, 0, \tau)] \\ \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=L} &= E(r, L, \tau), \quad T(r, z, 0) = T_0, \quad E(r, L, \tau) = H [T_1^4 - T^4(r, L, \tau)] \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь a — коэффициент температуропроводности, H — относительный коэффициент излучения, T_1 — температура излучателя, T_0 — начальная температура тела, $f(r, z, \tau)$ — температура окружающей среды, h , h_1 — относительные коэффициенты теплообмена по соответствующим поверхностям.

Преобразование Лапласа приводит краевую задачу (1) к следующей краевой задаче в изображениях:

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \frac{p}{a} r u \right] + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} &= - \frac{T_0}{a}, \quad \left(\frac{\partial u}{\partial r} + h u \right)_{r=R} = h F(r, z, p) \\ \left(\frac{\partial u}{\partial z} - h_1 u \right)_{z=0} &= h_1 F(r, z, p), \quad \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)_{z=L} = E_1(r, L, p) \end{aligned} \quad (2)$$