

следует постоянство ε^* и V вдоль каждой характеристики положительного наклона. Следовательно, уравнение их имеет вид

$$x = a(\varepsilon^*)(t - t_0) \quad (14)$$

Здесь t_0 — любая точка на оси t , для которой согласно краевому условию (10) известно давление $\Phi(t_0)$, или, что то же самое, $\varepsilon_0^*(t)$.

Решение задачи в области 2 получаем в форме волны Римана [2]

$$\varepsilon^* = \varepsilon_0^*(t - x/a(\varepsilon^*)), \quad V = - \int_0^{\varepsilon^*} a(\xi) d\xi \quad (15)$$

Деформации и скорости сечений стержня выражаются следующими формулами

$$\varepsilon = \varepsilon_0^*(t - x/a(\varepsilon - \varepsilon_s)) + \varepsilon_s(t - x/a_0) \quad (16)$$

$$v = - \int_0^{\varepsilon - \varepsilon_s} a(\xi) d\xi - a_0 \varepsilon_s(t - x/a_0)$$

В частности, если функция $\Phi(z)$ линейная

$$\Phi(z) = E_1 z \quad (E_1 < E)$$

то решение (16) переходит в известное решение для пластической области, приведенное в работе [1]. Из полученного решения видно, что в области 2 на пластические волны нагружения накладываются упругие релаксационные волны, возникающие за счет самопроизвольного уменьшения предела текучести материала во времени.

Если $\Phi'(0) \neq E$, то между областями 1 и 2 появляется область чистой релаксации напряжений (область 2' на фиг. 2), т. е. в этой области решение имеет вид

$$\varepsilon = \varepsilon_s(t - x/a_0), \quad v = -a_0 \varepsilon_s(t - x/a_0) \quad (17)$$

В области 2 в этом случае решение (16) остается справедливым.

Поступила 13 XII 1968

ЛИТЕРАТУРА

1. Ленский В. С., Фомина Л. Н. Распространение одномерных волн в материалах с запаздывающей текучестью. Изв. АН СССР, ОТН, Механика и машиностроение, 1959, № 3.
2. Рахматулин Х. А., Демьянов Ю. А. Прочность при интенсивных кратковременных нагрузках. М., Физматгиз, 1961.
3. Гуляев Ю. П., Ленский В. С. О волне разгрузки в материалах с запаздывающей текучестью. ПММ, 1968, т. 32, вып. 6.

ОБОБЩЕНИЕ РЕЖИМНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ РАБОТЕ СЕКЦИОНИРОВАННОГО ПЛАЗМОТРОНА С ПОДЖАТИЕМ КАНАЛА

В. А. Косаренков, Е. И. Рябцев, Г. П. Стельмах,
Н. А. Чесноков

(Москва)

Экспериментально исследованы вольт-амперные характеристики плазматрона с секционированным каналом при пониженных давлениях.

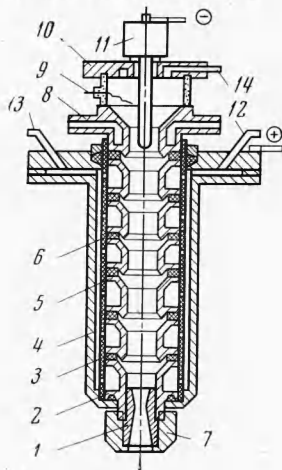
Для фиксации геометрических размеров дуги наиболее целесообразно применение протяженной межэлектродной электроизоляционной вставки. Однако на практике имеются трудности с подбором материала вставки вследствие довольно жесткого термического режима при горении дуги в канале, что приводит к использованию в технологических плазматронах электроизолированных охлаждаемых металлических секций, из которых набирается канал [1, 2]. Такая конструкция имеет некоторые недостатки по сравнению с плазматронами с единой межэлектродной вставкой (утечка электронов, повышенный теплоотвод в охлаждающие стенки). Тем не менее в настоящее время она достаточно широко используется на практике.

Вольт-амперные характеристики, позволяющие рассчитать геометрию плазмотрона и назначить режим его работы, как правило, получают в результате экспериментов, так как решение уравнений, являющихся математической моделью процессов в канале плазмотрона, в большинстве случаев затруднительно.

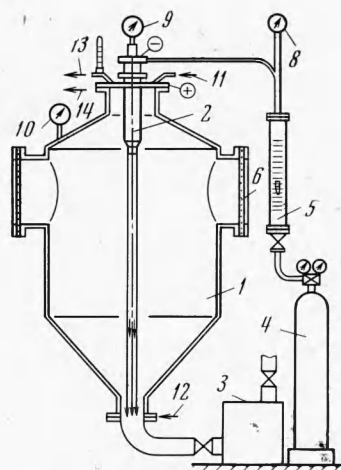
Исходными уравнениями, описывающими процессы в канале плазмотрона, будут: энергетическое уравнение в форме Геллера — Эленбааса, уравнение движения жидкости, уравнение состояния, закон Ома, соотношение, описывающее принцип минимума Штеенбека. Из этих уравнений выводятся критерии подобия, используемые для обработки опытных результатов. Между критериями подобия существует зависимость [2,3]

$$U = f(I, R, K, L), U = \frac{vd_k \sigma}{i}, \quad I = \frac{i^2}{G d_k \sigma h}, \quad R = \frac{w d_k}{v}, \quad K = \frac{\delta}{d_k}, \quad L = \frac{l}{d_k} \quad (1)$$

Здесь U — критерий, полученный из закона Ома; I — критерий, выведенный из энергетического уравнения; R — критерий Рейнольдса, получаемый из уравнения движения; K — критерий Кнудсена, характеризующий движение газа при пониженных давлениях; L — критерий геометрического подобия; здесь и далее σ — удельная электропроводность плазмы 1/ом.м; h — удельная энтальпия, ккал/кг; G — расход газа, г/сек; $\langle p \rangle$ — среднее давление в канале плазмотрона, н/м²; d_k, d_c — диаметры канала и критического сечения сопла, м; l — длина канала, м; T — температура струи, °К; w — скорость газа, м/сек; v — кинематическая вязкость, м²/сек; δ — длина свободного пробега, м; i — сила тока, а; v — напряжение, в.



Фиг. 1



Фиг. 2

Фиг. 1. Секционированный плазмотрон мощностью до 100 кВт; 1 — сопла диаметром 4, 8, 12, 16 мм, 2 — анодная секция, 3 — стакан — изолятор, 4 — корпус, 5 — промежуточные секции, 6 — межсекционные изоляторы, 7 — накидная гайка, 8 — вспомогательный анод, 9 — иницирующий электрод, 10 — кварцевая вставка, 11 — катододержатель с катодом, 12 — вход охлаждающей воды в каждую секцию, 13 — выход воды, 14 — вход плазмообразующего аргона

Фиг. 2. Экспериментальная установка; 1 — вакуумная камера, 2 — секционированный плазмотрон, 3 — вакуум-насос ВН-300, 4 — баллон аргона, 5 — ротаметр РС-5, 6 — смотровые окна, 7 — плазменная струя во время работы, 8 — манометр ОБМВ-160, 9, 10 — образцовые вакуумметры ОКВ, 11, 12 — вход воды, 13, 14 — выход охлаждающей воды

Для ряда процессов представляет интерес получение высокоскоростных и высокоэнтальпийных плазменных струй. Повышения скорости струи можно добиться различными путями: увеличением расхода газа, понижением давления в системе, а также установлением на выходе из плазменного канала геометрических сопел, позволяющих получать необходимые расчетные режимы истечения плазменных потоков. Установление сопел приводит к изменению электрических параметров работы плазмотронов, которые оказываются заметно зависимыми от степени поджатия канала соплом-диафрагмой.

Повышение давления в канале плазмотрона вследствие диафрагмирования ведет к изменению вольт-амперных характеристик дуги. Изменение давления может быть учтено через критерий K , но тем не менее при обработке получается расслоение кривых в зависимости от диаметра сопел-диафрагм. Если учесть, что критерий Кнудсена может быть выражен через критерии Рейнольдса и Маха ($K = M / R^{0.5}$), то можно записать в соответствии с теорией подобия уравнение (1), опустив критерий R и одновременно при этом дополнив его другим критерием (обобщенной переменной), чтобы число определяющих критериев осталось неизменным. Как показала последующая обработка экспериментальных результатов, такой удобной обобщенной переменной в первом приближении, по-видимому, может быть параметрический критерий, представляющий собой отношение диаметра канала к диаметру сопла $D = d_k / d_c$, т. е. соотношение (1) принимает вид

$$U = A I^m K^n L^n D^q \quad (2)$$

В данной работе производились экспериментальные исследования секционированного плазмотрона с соплами-диафрагмами. Плазмотрон (фиг. 1) состоял из шести секций с диаметром канала 20 мм, высотой 20 мм. В анодной секции крепились сопла с диаметрами 4, 8, 12, 16 мм. Расход газа (аргона) в опытах изменялся в диапазоне $0.2 \div 3.5$ г/сек. Экспериментальная установка изображена на фиг. 2. Струя плазмы истекала в камеру диаметром 800 мм и высотой 1500 мм. Давления в камере в процессе опытов были $1.33 \cdot 10^2 - 1.33 \cdot 10^3$ н/м², в то же время давление в канале при поджигании соплами изменялось в диапазоне $1.33 \cdot 10^3 \div 1.33 \cdot 10^5$ н/м². Одновременно со снятием вольт-амперных характеристик производился замер величины энтальпии струи на выходе из сопла. Энтальпия вычислялась посредством снятия теплового баланса плазмотрона. Разность между электрической мощностью, подводимой к дуге, и замеренными суммарными теплотериями через каждую секцию, отнесенная к расходу газа, дает энтальпию струи на выходе из сопла [4]. По значению энтальпии, пользуясь табличными данными [5], определялась среднemasовая температура потока плазмы по выходе из плазмотрона.

Первичные данные опытов приведены в таблице.

d_c , см	i , а	v , г	G , г/сек	h , ккал/кг	$\langle P \rangle$, н/м ²	T , °K	K	U	I
2.0	500	81	0.62	6340	$6.34 \cdot 10^3$	11300	$1.93 \cdot 10^{-2}$	32.4	690
	475	84	1.18	4230	$9.33 \cdot 10^3$	10800	$1.72 \cdot 10^{-2}$	35.0	346
	450	90	1.84	3120	$1.23 \cdot 10^4$	10300	$1.56 \cdot 10^{-2}$	50.0	206
	400	97	3.40	1780	$1.83 \cdot 10^4$	9700	$1.34 \cdot 10^{-2}$	48.5	94
1.6	450	84	1.16	3375	$9.86 \cdot 10^3$	10300	$1.54 \cdot 10^{-2}$	37.2	331
	425	88	1.78	2700	$1.31 \cdot 10^4$	10100	$1.41 \cdot 10^{-2}$	41.5	196
	410	92	2.50	2100	$1.69 \cdot 10^4$	9700	$1.25 \cdot 10^{-2}$	44.7	135
	400	93	3.37	1700	$2.12 \cdot 10^4$	9300	$1.12 \cdot 10^{-2}$	49.0	99
1.2	500	83	0.60	5850	$9.66 \cdot 10^3$	11500	$1.27 \cdot 10^{-2}$	33.2	700
	425	89	1.90	2140	$2.02 \cdot 10^4$	10000	$9.35 \cdot 10^{-3}$	42.0	186
	410	95	2.57	1730	$2.66 \cdot 10^4$	9500	$7.86 \cdot 10^{-3}$	46.4	134
	400	101	3.24	1140	$3.18 \cdot 10^4$	9000	$7.10 \cdot 10^{-3}$	50.5	110
0.8	450	90	0.79	2110	$2.16 \cdot 10^4$	9950	$5.56 \cdot 10^{-3}$	40.0	497
	450	99	1.40	1840	$3.54 \cdot 10^4$	9600	$4.40 \cdot 10^{-3}$	44.0	294
	400	101	2.10	1270	$4.76 \cdot 10^4$	8800	$3.37 \cdot 10^{-3}$	50.4	168
	390	102	2.32	1160	$5.26 \cdot 10^4$	8450	$3.59 \cdot 10^{-3}$	52.1	150
0.4	400	110	3.71	287	$4.8 \cdot 10^4$	2400	$1.68 \cdot 10^{-3}$	55.0	320
	450	104	2.88	232	$4.9 \cdot 10^4$	2000	$1.28 \cdot 10^{-3}$	46.1	614
	450	100	2.23	252	$4.96 \cdot 10^4$	2100	$1.14 \cdot 10^{-3}$	44.3	759
	450	93	1.64	461	$5.0 \cdot 10^4$	3560	$1.60 \cdot 10^{-3}$	43.5	594
	200	73	1.04	296	$5.12 \cdot 10^4$	2480	$8.46 \cdot 10^{-4}$	73.1	277

Полученные результаты с целью сопоставления с известными критериальными соотношениями обрабатывались в обобщенной форме в виде зависимости (2) для постоянного параметра $L = 6$.

При вычислении критериев подобия в случае описания работы плазмотрона основная трудность заключается в оценке определяющей температуры.

Предыдущие тепловые исследования кид плазменного нагрева [6] позволили в качестве определяющей температуры газа (плазмы) взять среднеарифметическую из температур на входе в канал и выходе из канала. Скорости и величина энтальпии отнесены к этой температуре. Разброс экспериментальных результатов при такой обработ-

ке не превышал $\pm 10\%$. Однако температура на выходе из плазматрона сама является определяемой. Поэтому, как и при расчете теплообменных аппаратов, приходится идти методом последовательных приближений, задаваясь предварительно этой температурой и впоследствии корректируя ее в результате расчета. В данном случае при предварительных расчетах по предлагаемым ниже критериальным соотношениям можно воспользоваться найденной экспериментальной зависимостью температуры на выходе из сопла от его диаметра (при неизменных мощности на дуге и расходе $T = 10000-9500^\circ\text{K}$ для $D = 1 \div 2$ и $T = 2500^\circ\text{K}$ для $D = 2 \div 5$). Эта определяющая температура может быть использована при оценке энтальпий, коэффициентов вязкости, теплопроводности и плотности, которые в исследуемых диапазонах температур изменяются монотонно или линейно с температурой. Практически определяющая температура для вычисления энтальпий и скоростей равна половине температуры потока на выходе из сопла.

При оценке величины электропроводности относить ее значение к указанной температуре, как показала обработка, нецелесообразно, так как $\sigma = \sigma(T)$ имеет резко выраженный характер, особенно при температурах, меньших 9000°K .

Исходя из модели каналовой дуги, по которой токопроводящими являются приосевые области дуги, где температура выше 10000°K , оказалось возможным принять некоторое среднее значение электропроводности для этой температурной зоны, так как при температурах выше 9000°K изменение σ с температурой становится небольшим [5]. Подобное допущение, несмотря на некорректность, позволяет выразить экспериментальные данные более строго в соответствии с теорией подобия, чем при использовании часто применяемых размерных комплексов $U = vd_k / i$, $I = i^2 / Gd_k$. При вычислении критериев подобия в данной работе величина удельной электропроводности принималась равной $\sigma = 10^4 \text{ 1/ом}\cdot\text{м}$, что соответствует средней температуре 10000°K . Эта величина, строго говоря, могла быть введена в коэффициент A уравнения (2). Однако сохранение теоретической формы критериев подобия и оценка их действительных значений имеет определенные удобства при анализе характера и режимов процессов переноса.

Такая обработка первичных данных таблицы позволила получить зависимость

$$U = 1.91 I^{-0.2} K^{-1.0} D^{-1.3}, \quad 10^2 < I < 10^3, \quad 5 \cdot 10^3 < K < 5 \cdot 10^2, \quad 1 < D < 5 \quad (3)$$

Разброс опытных результатов от среднего значения U не превышает при этом $\pm 15\%$. Если учесть зависимость $U \sim L^{0.65}$ [8], то можно записать

$$U = 0.6 I^{-0.2} K^{-1.0} D^{-1.3} L^{0.65}, \quad (0.3 < L < 11.0) \quad (4)$$

Полученные результаты опытов позволяют производить практическую оценку работы подобных секционированных плазматронов с поджатием канала при давлениях в канале ниже $1.33 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$.

Поступила 30 V 1969

ЛИТЕРАТУРА

1. Шейндлин А. Е., Асиновский Э. И. Некоторые результаты исследований стабилизированной аргоновой дуги. В сб.: «Исследования при высоких температурах», М., «Наука», 1967.
2. Даутов Г. Ю., Жуков М. Ф., Коротеев А. С., Смеяков В. Я., Сухинин Ю. И., Ясько О. И. Особенности работы генераторов низкотемпературной плазмы с вихревой стабилизацией дуги и обобщение результатов исследований. В сб.: «Низкотемпературная плазма», М., «Мир», 1967.
3. Жидович А. И., Кравченко С. К., Ясько О. И. Плазматрон двустороннего истечения с переменным диаметром электродов. Инж.-физ. ж., 1968, т. 15, № 2.
4. Стельмах Г. П., Чесноков Н. А., Сахиев А. С. Об особенностях теплообмена в канале секционного газового электродугового подогревателя. Инж.-физ. ж., 1966, т. 10, № 4.
5. Греков Л. И., Москвин Ю. В., Романович В. С., Фаворский О. Н. Основные свойства некоторых газов при высоких температурах. М., «Машиностроение», 1964.
6. Чесноков Н. А., Стельмах Г. П., Сахиев А. С. О влиянии давления на коэффициент полезного действия секционных дуговых газовых подогревателей. Теплофизика высоких температур, 1966, т. 4, № 2.
7. Ясько О. И. О механизме теплообмена в электрических дугах. II Всес. совещание по тепло- и массообмену, Минск, «Наука и техника», 1964.
8. Стельмах Г. П., Чесноков Н. А., Сологуб В. А. Об обобщенной характеристике секционного электродугового газового подогревателя с вихревой стабилизацией электрической дуги. Изв. СО АН СССР, Сер. техн. н., 1967, № 3, вып. 1.