

ДИНАМИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДУГИ  
И ЕЕ ПОВЕДЕНИЕ В КАНАЛЕ ПЛАЗМОТРОНА

А. С. Аншаков, М. Ф. Жуков, А. Н. Тимошевский

(Новосибирск)

Изучение устойчивости горения электрической дуги в плазмотроне связано с исследованиями не только статических характеристик, но и их нестационарности. Многочисленные исследования показывают, что дуга постоянного тока в плазмотроне не является стационарной: колебаниям подвержены ток, напряжение, а также длина дуги в канале. Постоянные пульсации электрических параметров обусловлены в основном процессом шунтирования дуги. Наряду с этим существуют также нестационарные процессы, не связанные с шунтированием. Если говорить об области  $U - I$ -характеристик, то наибольший интерес представляют динамические процессы на восходящих ветвях вольт-амперных характеристик дуги. В работе [1] показано, что на восходящей ветви  $E - I$ -зависимости имеются локальные области, где напряженность электрического поля дуги с ростом тока падает, причем полная статическая  $U - I$ -характеристика не отражает таких изменений. Происходящий процесс «выравнивания» полной вольт-амперной характеристики связан с некоторыми изменениями структуры дуги в канале и возникновением электрических колебаний.

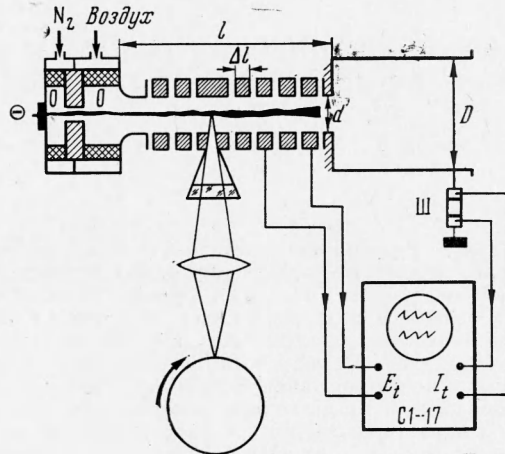
В данной статье изложены результаты экспериментального исследования электрических параметров дуги и ее поведения в канале плазмотрона при восходящей вольт-амперной характеристике. Показано наличие неустойчивых областей на восходящем участке, где происходит «генерация» тока и напряжения дуги. В режиме неустойчивости резко меняется структура дуги в канале плазмотрона. Причиной появления неустойчивости является своеобразие в зависимости напряженности электрического поля дуги от тока на восходящем участке.

1. Все экспериментальные исследования проведены на плазмотроне, схема которого приведена на фиг. 1. Торцевой электрод (катод) изготовлен из торированного вольфрама, впаянного в медную обойму. Для предотвращения интенсивной эрозии катода во время его работы он защищен азотом ( $G = 2-3$  г/сек), который непрерывно подавался в соответствующую вихревую камеру. Рабочим газом был воздух. Выходной электрод (анод диаметром  $D$ ) выполнен из меди. Для измерения напряженности электрического поля дуги участок дуговой камеры длиной  $l$  и диаметром  $d$  набирался из секций толщиной  $\Delta l = 0.8$  см. Длина первой секции, образующей вход канала, 1.5—2 калибра.

Все секции электрически изолировались друг от друга стеклотекстолитовыми шайбами. В экспериментах внутренний диаметр канала  $d = 2.5$  и 3.0 см. Диаметр выходного электрода  $D$  выбирался таким, чтобы отношение  $D/d$  оставалось постоянным и равным 1.8—1.9. Измерительные секции охлаждались воздухом, остальные узлы плазмотрона — водой. Расходы рабочего и защитного газов измерялись соответственно расходомером типа ДМКВ и ротаметром РС-5.

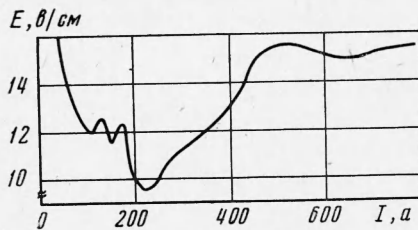
Изменение напряженности электрического поля дуги от тока во времени изучалось с помощью двухлучевого осциллографа С1-17. Один из его лучей фиксировал сигнал переменной составляющей тока дуги  $I_t$ . На другой луч через блок дифференциального усилителя подавался сигнал разности потенциалов двух секций  $\Delta U_t$  (фиг. 1). Отснятые таким образом осциллограммы отражают динамическую зависимость  $E$  при изменении  $I$  в течение короткого промежутка времени (порядка  $10^{-4}$  сек).

Для изучения пространственного поведения дуги в канале плазмотрона применялась специальная оптическая секция с поперечной щелью на весь диаметр канала. Запись колебаний столба дуги во времени производилась фоторегистратором ФР-1 по схеме, которая изображена на фиг. 1.



Фиг. 1

Плазмотрон и фоторегистр в этих экспериментах были жестко закреплены. Амплитудно-частотные характеристики переменных составляющих тока  $I_t$  и полного напряжения дуги  $U_t$  снимались прибором СК4-3. Осуществлялось также осциллографирование  $I_t$  и  $U_t$  с помощью осциллографа ОК-17М. Статические вольт-амперные характеристики дуги исследуемого плазмотрона и зависимость их от различных параметров приведены в работе [2].



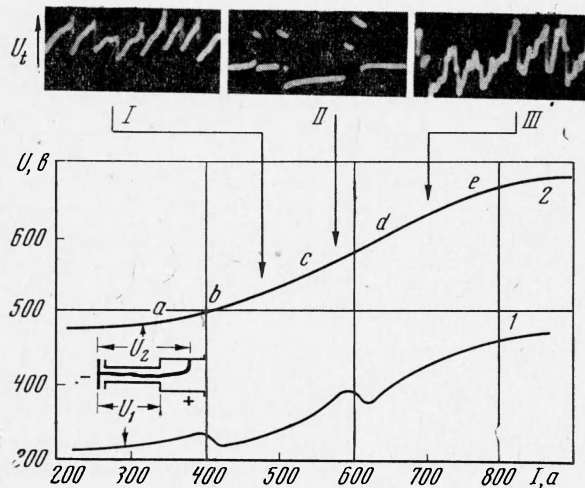
Фиг. 2

2. В работе [3] описаны флуктуации электрических параметров дуги плазмотрона с самоуставляющейся длиной, связанные с процессом шунтирования. Эти колебания, как показано, случайные и подчиняются закону нормального распределения. В общем случае такая закономерность остается справедливой и для дуг с фиксированной длиной в режимах работы как на падающей, так и на восходящей ветвях вольт-амперной характеристики. Однако наряду с этим существуют некоторые особенности колебаний тока и напряжения дуги, присущие только отдельным областям на восходящих участках  $U - I$ -характеристик. Если принимать во внимание лишь интегральную вольт-амперную характеристику, то практически невозможно указать на эти области. Появление неустойчивых зон связано с зависимостью напряженности электрического поля от тока дуги [1].

На фиг. 2 в качестве примера приведена  $E - I$ -характеристика участка дуги, горящей в канале  $d = 2.5 \text{ см}$ ,  $G = 30 \text{ г/сек}$ . Как видно, при изменении тока напряженность поля меняется немонотонно — на восходящей кривой имеются также участки падения  $E$  с ростом  $I$ . Учитывая результаты исследований  $E$ , следовало ожидать, что и на интегральной вольт-амперной характеристике (возрастающей ее ветви) будут наблюдаться

области падения напряжения  $U$  в зависимости от  $I$ . Для большей части длины дуги  $U - I$ -зависимость, как видно на фиг. 3 (кривая 1), имеет эти особенные области. Кривая 1 является вольт-амперной характеристикой участка дуги от катода до среза уступа.

Интегральная (полная) вольт-амперная характеристика всей длины дуги представлена кривой 2. Изменению вида последней по сравнению с кривой 1 отчасти способствуют  $U - I$ -характеристики начального участка дуги в районе вихревых камер и выходного участка в канале диаметром  $D$ . Как замечено в опытах, выравнивание полной вольт-амперной характеристики происходит главным образом за счет динамики поведе-



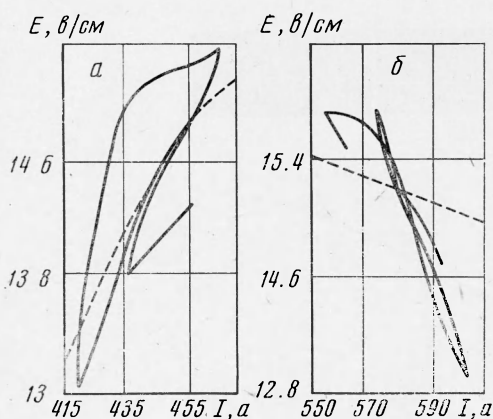
Фиг. 3

ния столба дуги в областях падения напряженности. При этом характер колебаний  $I_t$  и  $U_t$  претерпевает значительные изменения. Так, на фиг. 3 приведены осциллограммы переменной составляющей напряжения дуги, снятые в областях  $b - c$  (I),  $c - d$  (II) и  $d - e$  (III). Они демонстрируют поведение колебаний  $U_t$  связанных с шунтированием на различных участках  $U - I$ -характеристик ( $d = 2.5$  см,  $l = 14.5$  см,  $G = 60$  г/сек). Если вид осциллограмм I и III характерен для процесса шунтирования со свойственным ему ростом напряжения при удлинении дуги и последующим резким спадом, то этого нельзя отнести к осциллограмме II. В последнем случае наблюдаются почти прямоугольные импульсы  $U_t$ , которые могут быть вызваны самыми разнообразными причинами из-за нестабильности горения дуги. Надо отметить, что приведенная осциллограмма II, вообще говоря, не является строго типичной в отличие от осциллограмм I и III. В области нестабильности наблюдаются довольно разнообразные формы колебаний напряжения и тока дуги, но существует одна особенность — это значительное их качественное отличие от колебаний, связанных с «чистым» шунтированием.

Если выравнивание (сглаживание) полной статической вольт-амперной характеристики происходит за счет периодического изменения длины дуги, обусловленного ее шунтированием, то в динамике должны существовать временные отрезки, когда напряжение от тока будет иметь падающий вид, определяемый поведением  $E = f(I)$ . В этой связи особенно необходимо знать динамику изменения напряженности электрического поля дуги от тока. Если исходить из уравнения динамической характе-

ристки [4] и рассматривать возмущения, воздействующие на дугу, с периодом, большим чем характерное время релаксации, то динамическая характеристика будет определяться поведением статической вольт-амперной характеристики. Однако вопрос заключается в том, насколько точно соответствует динамическое изменение напряженности  $E$  в зависимости от  $I$  изменению статической характеристики, поскольку колебания длины дуги на мерной базе могут вносить между ними некоторое несоответствие.

С целью изучения динамики дуги были проведены эксперименты по описанной выше методике. Обработка многих осциллограмм показала,



Фиг. 4

что наклон динамической характеристики достаточно хорошо совпадает с наклоном касательной к статической кривой зависимости  $E$  от  $I$  только в случае восходящего участка  $E - I$ -характеристики. Это можно наблюдать на фиг. 4, на которой показаны динамические  $E - I$ -характеристики,  $d = 2.5$  см  $G = 30$  г/сек;  $a$  — восходящий участок,  $b$  — область падения.

На фиг. 4,  $a$  пунктирной линией обозначен участок статической  $E - I$ -зависимости. Для области падения величины напряженности в зависимости от

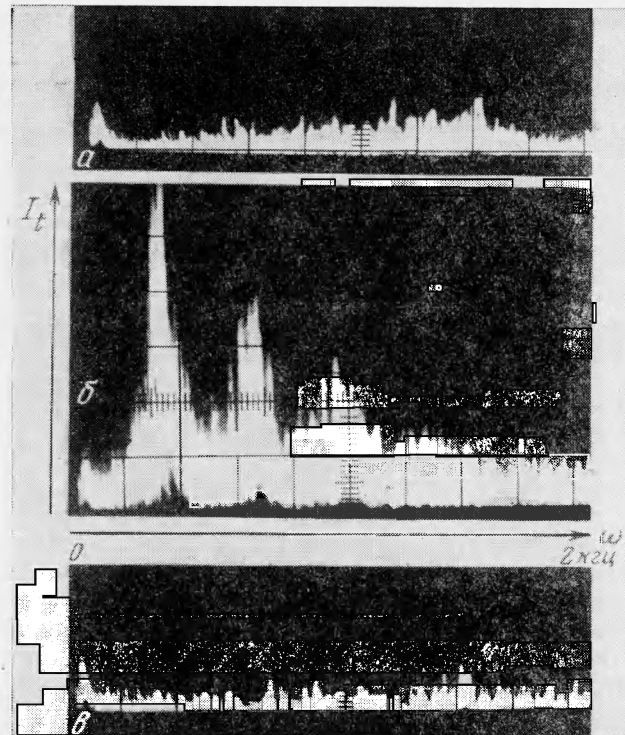
тока свойственна гораздо большая крутизна наклона динамического изменения  $E$  по отношению к статической характеристике (фиг. 4,  $b$ ). Так, изменение тока в диапазоне 50  $a$  приводит к изменению напряженности по статической кривой (пунктирная линия фиг. 4,  $b$ ) всего лишь на 0.4  $v/cm$ , в то время как по динамической характеристике  $\Delta E \approx 2$   $v/cm$ . Отмеченный характер поведения динамики  $E$  экспериментально наблюдался и при других рабочих параметрах плазмотрона, а также присущ  $E - I$ -характеристикам начального участка дуги.

Полученные данные показывают, что, несмотря на выравнивание полной вольт-амперной характеристики дуги плазмотрона, в динамике на  $U - I$ -характеристике существуют области падения напряжения дуги с ростом тока на восходящей ветви вольт-амперной характеристики.

3. Рассмотрим особенности колебаний электрических параметров дуги на восходящих ветвях  $U - I$  характеристик в областях неустойчивости. Как было показано выше, появление участков неустойчивости вольт-амперной характеристики связано с изменением вида  $E - I$ -зависимости, причем характерной чертой этих областей является наличие отрицательного дифференциального сопротивления дуги  $R^*$ . При определенных условиях это приводит к возникновению незатухающих колебаний тока и напряжения. Убедимся, что переход дуги в режим генерации возможен при невыполнении одного из условий устойчивости [5], например, неравенства  $R + R^* > 0$ , где  $R$  — величина омического сопротивления в цепи питания плазмотрона. Исследования [1], а также динамическая характеристика дуги (см. фиг. 4,  $b$ ) указывают на реальность достижения очень больших отрицательных значений  $R^*$  во второй области неустойчивости на восходящей ветви вольт-амперной характеристики (например, область  $c - d$  на фиг. 3). Поэтому возникновение незатухающих коле-

баний тока дуги и напряжения в указанной области должно наблюдаться для плазмотронов с различными рабочими параметрами и практически при любых значениях  $R$ , что и было проверено экспериментально.

На фиг. 5 представлены регистрограммы амплитудно-частотных характеристик колебаний тока дуги  $I_t$  при  $d = 3.0$  см,  $l = 24$  см,  $G = 80$  г/сек;  $a - I = 650$  а,  $b - 850$  а,  $в - 1200$ . Источником питания служил генератор с номинальным напряжением 750 в. Для выбранных параметров  $G, d, l$  вторая область неустойчивости относительно минимума вольт-амперной характеристики расположена в районе 800—900 а по току.



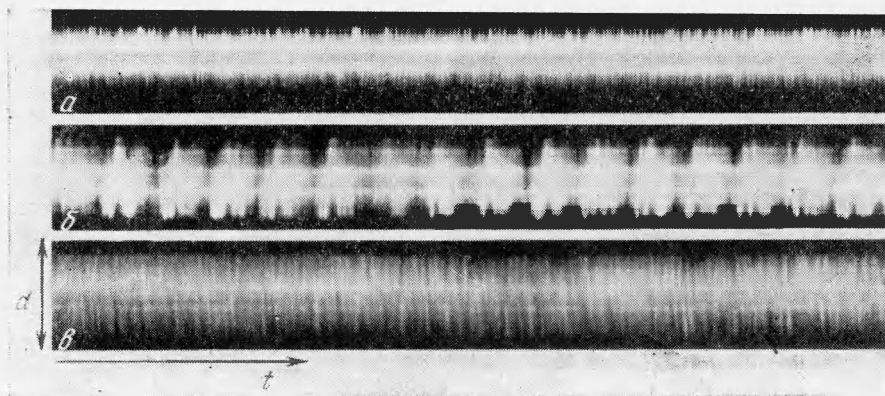
Фиг. 5

Регистрограммы  $a$  и  $в$  показывают спектр колебаний при токах 650 и 1200 а, соответствующих положительной характеристике, регистрограмма  $б$  относится к области неустойчивости. Как видно, при токе 850 а спектр колебаний резко меняется. Если в устойчивых областях он представляет собой просто шум, вызванный случайным характером шунтирования дуги в канале  $D$ , то регистрограмма фиг. 5,  $б$  фиксирует четкие максимумы  $I_t$ . Амплитуда колебаний тока возрастает в первом максимуме почти на порядок по сравнению с величинами  $I_t$ , приведенными на фиг. 5,  $a, в$ . Необходимо отметить, что полученный спектр (фиг. 5,  $б$ ) не вызван колебаниями источника питания, частота которых 1500 гц. Регистрограммы колебаний напряжения дуги, снятые при тех же режимах работы плазмотрона, показывают аналогичное поведение  $U_t$ .

Обращает на себя внимание спектр разложенных сигналов. Действительно, дуга в плазмотроне, представленная как индуктивность, емкость и омическое сопротивление совместно с элементами цепи питания, образует колебательный контур, которому соответствует частота  $\omega_0$ . При



возбуждении этого контура колебания  $I_t$  и  $U_t$  должны иметь синусоидальный вид, а спектр сигналов — один максимум на частоте  $\omega_0$ . Однако на регистрограмме фиг. 5, б хорошо видны четыре максимума на частотах  $\sim 320, 640, 960, 1280$  гц, т. е. происходит увеличение в 2, 3, 4 раза. Спадание амплитуды  $I_t$  идет приблизительно как  $1/n$ . Следовательно, спектр представляет собой разложение не синусоидального сигнала, а сигнала, например, близкого к пилообразной форме. Это говорит о том, что на процесс формирования генерируемых сигналов, возможно, влияет некоторое движение дуги, поскольку других существенных причин нет.



Фиг. 6

Поэтому исследования пространственного поведения столба дуги в канале плазматрона являются интересными с точки зрения возможного объяснения генерации напряжения и тока.

4. Выше уже указывалось на выравнивание статической вольт-амперной характеристики дуги плазматрона из-за возникновения значительных колебаний длины дуги. Этим же можно объяснить и данные фиг. 4, б, показывающие в динамике большую крутизну спадания величины напряженности в зависимости от тока, чем в статике, т. е. на исследуемом участке  $E - I$ -характеристики должна наблюдаться пространственная неустойчивость столба дуги.

Регистрограммы временной развертки поперечных колебаний дуги в канале плазматрона при  $d = 2.5$  см,  $G = 30$  г, сек представлены на фиг. 6 ( $a - I = 420$ ,  $b - I = 560$  а,  $c - I = 700$  а). Расстояние от катода до сечения канала, в котором производилась съемка фоторегистром (фиг. 1), равно 8 см. Скорость движения пленки 3 м/сек. Анализ приведенных на фиг. 6 фотографий показывает, что на участках возрастания напряженности от тока (фиг. 2) как слева, так и справа от области падения напряженности поперечных колебаний дуги не наблюдается (фиг. 6, а, в). На регистрограммах видны лишь высокочастотные пульсации, которые вызваны, по-видимому, движением закрученного потока газа. Видно, что с увеличением тока световой диаметр дуги возрастает. В области падения напряженности от тока дуги вид регистрограмм резко меняется (фиг. 6, б) — появляются хорошо наблюдаемые отклонения дуги от оси канала. Движение дуги носит очень четкий периодический характер — некоторое время она нестабильна и отклоняется от центра канала, но имеется промежуток времени, когда дуга вновь занимает положение на оси; затем этот процесс повторяется. Поэтому регистрограмма фиг. 6, б имеет пуч-

кообразный вид. Частота повторения этих пучков 315—340 гц. В моменты отклонения дуги от оси меняются ее напряжение и ток, что и фиксирует спектр разложения сигналов (фиг. 5, б). Проведенные оценки диаметра столба дуги по данным фиг. 6, б позволяют предположить, что неустойчивость поведения дуги сопровождается одновременным ее контрагированием.

На возможность уменьшения поперечных размеров дуги в области падения величины напряженности  $E$  в зависимости от  $I$  указывают также результаты численного расчета [1]. В настоящее время не представляется возможным определить истинные причины отклонений дуги от осевого положения, однако они в данном случае не связаны с потерей гидродинамической устойчивости. Остановимся на одной из возможных причин.

В работе [6] при рассмотрении вопроса смещения дуги с оси было получено соотношение, определяющее скорость дуги относительно вещества  $V$

$$(V \cdot \nabla_m) \nabla T = - \nabla_m \left\{ \frac{1}{\rho c_p} \left( \frac{j^2}{\sigma} - \operatorname{div} W + a \dots \right) \right\}$$

где  $\nabla_m$  — градиент в области максимума температуры,  $\rho$  — плотность,  $j^2 / \sigma$  — омический нагрев,  $\operatorname{div} W$  — потери на теплопроводность,  $W = - \lambda \nabla T$ ,  $a$  — поглощение излучения в единице объема.

Движение дуги может быть вызвано, например, неоднородностью поглощения  $a$ . При движении неоднородно нагретой дуги, когда не учитывается изменение максимума температуры  $T_m$ , член в правой части уравнения, соответствующий градиенту  $\operatorname{div} W$ , увеличивается в точке максимума, что замедляет движение дуги. Это является следствием изменения кривизны распределения температуры по диаметру в направлении смещения дуги. Если предположить, что в районе максимума температуры теплопроводность  $\lambda$  с ростом  $T_m$  с некоторого момента начинает падать, то градиент  $\operatorname{div} W$  в точке максимума будет меняться с переменной знака. Иначе говоря, может возникнуть такая ситуация, когда даже при случайном отклонении дуги от осевого положения, она не возвратится в исходное положение, а будет продолжать движение к стенке канала. Это одна из возможностей появления колебаний дуги в области снижения напряженности от тока, вызываемая уменьшением  $\lambda$  с ростом  $T$ . В действительности исследуемое явление гораздо сложнее. По-видимому, при рассмотрении причин движения дуги нельзя пренебрегать и ее собственным магнитным полем.

Поступила 3 V 1973

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Жуков М. Ф., Тимошевский А. Н. Некоторые особенности в напряженности электрического поля дуги. Тезисы докладов 5-й Всесоюзной конференции по генераторам низкотемпературной плазмы, ч. 1, Новосибирск, 1972.
2. Аньшаков А. С., Тимошевский А. Н. Об особенностях обобщения восходящих вольт-амперных характеристик дуги. Тезисы докладов 5-й Всесоюзной конференции по генераторам низкотемпературной плазмы, ч. 1, Новосибирск, 1972.
3. Аньшаков А. С., Даутов Г. Ю., Мустафин Г. М., Петров А. П. Исследования пульсаций в плазмотроне с самоустанавливающейся дугой. ПМТФ, 1967, № 1.
4. Грановский В. Л. Электрический ток в газе. М.—Л., Гостехиздат, 1952.
5. Даутов Г. Ю., Жуков М. Ф., Смоляков В. Я. Исследование работы плазмотрона с воздушной стабилизацией дуги. ПМТФ, 1961, № 6.
6. Maesker H. Principles of arc motion and displacement. Proc. IEEE, 1971, vol. 59. No. 4