

где невозможно использовать теневой прибор. При визуальном наблюдении видна пространственная картина течения, которую можно зафиксировать с помощью стереосъемки. Кроме этого, данный способ визуализации позволяет наблюдать как присоединенные, так и оторвавшиеся от поверхности модели вихри, в то время как с помощью жидкой пленки можно наблюдать только следы присоединенных вихрей, которые исчезают в зоне отрыва. Если произвести фотографирование под разными углами по отношению к модели, можно оценить толщину вихря и расстояние, на которое он отрывается от поверхности модели.

В заключение авторы выражают благодарность А. В. Подмазову за помощь в проведении эксперимента.

Поступила 11 III 1968

ЛИТЕРАТУРА

1. Schumacher B. W., Gadamer E. O. Electron beam fluorescence probe for measuring the local gas density in a wide field of observation. «Canad. J. Phys.», 1958, vol. 36, No. 6.
2. Трохан А. М. Измерение параметров газовых потоков при помощи пучка быстрых электронов. ПМТФ, 1964, № 3, стр. 81.
3. Винклер Е. М. Методы, основанные на явлениях электрического разряда и послесвечения. Сб. Физические измерения в газовой динамике и при горении. М., Изд-во иностр. лит., 1957.
4. Vomburg H. I. A new glow — discharge new method for flow visualization in supersonic wind tunnels. J. Aero/Space Sci., 1958, vol. 25, No. 11.
5. Говен Ф. Е., Гопкинс В. Д. Аэродинамическая труба с электродуговым подогревателем воздуха, рассчитанная на получение скоростей в диапазоне чисел M от 10 до 20. Сб. Современная техника аэродинамических исследований при гиперзвуковых скоростях (под ред. А. М. Крилла), М., «Машгиз», 1965.
6. Столдер. Использование аэродинамических труб малой плотности в аэродинамических исследованиях. Сб. Газодинамика разреженных газов (под ред. М. Девиена), М., Изд-во иностр. лит., 1963.
7. Калугин В. М. Высокочувствительный способ тлеющего разряда для визуализации сверхзвуковых течений разреженного газа. ПМТФ, 1966, № 4.
8. Мессиг., Бархоп Е. Электронные и ионные столкновения. М., Изд-во иностр. лит., 1958.
9. Кишко С. М., Кучинка М. Ю. Функции возбуждения некоторых полос второй положительной системы. Оптика и спектроскопия, 1959, т. 6, вып. 5.
10. Калачев Б. В. Исследование импульсного разряда в потоке воздуха большой скорости, ЖЭТФ, 1963, т. 45, вып. 2 (8).
11. Алферов В. И., Бушмин А. С., Калачев Б. В. Экспериментальное исследование свойств электрического разряда в потоке воздуха. ЖЭТФ, 1966, т. 51, вып. 5 (11).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЭЛЕКТРОДНЫХ ЯВЛЕНИЙ

Ю. В. Барышев, В. О. Герман, Б. В. Парфенов, Б. С. Соловьев

(Москва)

Изучается прикатодное изменение потенциала в зависимости от силы тока, протекающего через газ, при различном содержании присадки в потоке, при некотором диапазоне температур рабочей поверхности электрода и различных материалах электрода. Рассматривается упрощенная модель с учетом возможности перенесения полученных результатов на натурную установку. Упрощение достигается исключением из рассмотрения магнитного поля и переходом к исследованию в режиме приложенного к электродам электрического поля.

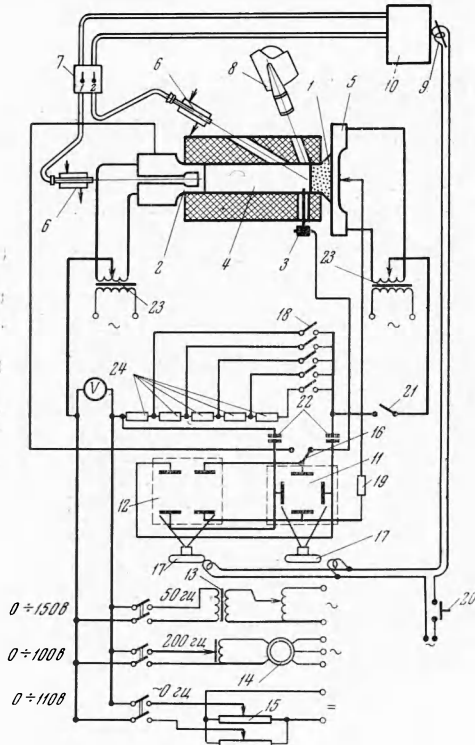
Установка. Источником низкотемпературной воздушной плазмы служит плазмотрон постоянного тока мощностью 300 *квт* с газовой стабилизацией дуги [1]. Параметры газа на входе в рабочий канал: среднemasовая температура $\sim 2400\text{--}2600^\circ\text{K}$, скорость $\sim 350\text{--}450$ *м/сек*, расход $\sim 30\text{--}35$ *г/сек*.

Газ, выходящий из сопла плазмотрона, проходит через устройство для ввода присадки (концентрация калия $\psi = 0\text{--}1.2\%$) и форкамеру. Форкамера служит для улучшения перемешивания присадки с потоком и формирует поток для входа в керамический неохлаждаемый канал 4 (фиг. 1) длиной 180 и сечением 50×18 *мм*², собранный из отдельных прямоугольных блоков. В боковые стенки канала вмонтированы электроды.

Температура T_w рабочей поверхности электрода непрерывно измеряется пирометром ТФПГ-1 и регистрируется на ЭПП-09. Спектральные характеристики фотодиода ($\lambda_{eff} = 1.5$ *мк*) пирометра 6 подобраны таким образом, чтобы свести к минимуму влияние изучения присадки калия.

Магнитная система ОСМУ-2 обеспечивает магнитное поле до 1.6 тл в зазоре 80 мм. Размеры полюсных наконечников 800×100 мм.

Измерительная схема (фиг. 1). С целью исследования влияния на вольт-амперные характеристики частоты напряжения питания в схеме использованы три источника



Фиг. 1

постоянного тока 15, переменного тока 13 частотой 50 гц и переменного тока 14 частотой 200 гц. В ходе эксперимента поочередно включают все три источника, причем напряжение постоянного тока плавно изменяется от -110 в до +110 в. Амплитуда напряжения переменного тока — 150 в.

В токовую цепь включены пять сопротивлений 24, которые выполняют роль балластных и одновременно служат для измерения тока. Падение напряжения на этих сопротивлениях пропорционально величине тока, следовательно, отклонение лучей осциллографов 11, 12, также пропорционально току. Переключателем 18 шунтируется часть сопротивлений, что означает изменение масштаба по току.

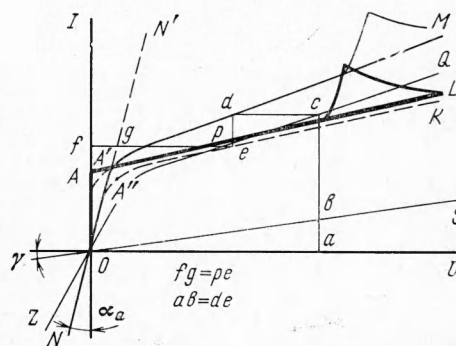
В зависимости от положения переключателя 16 на осциллографы подается напряжение между электродами 1 и 2 или между электродом 1 и зондом 3.

Осциллограф 12 — двухлучевой. На его экране первый луч дает развертку тока, второй — развертку напряжения. Осциллограф 11 — однолучевой. На его экране отклонение по вертикали пропорционально напряжению, отклонение по горизонтали пропорционально току. Таким образом, описываемая лучом кривая будет вольтамперной характеристикой. Экраны обоих осциллографов фотографируются. Спуск аппаратов синхронизирован. По мере повышения температуры электрода производится

съемка вольт-амперных характеристик. Момент съемки каждого кадра автоматически отмечается на ленте прибора 10, регистрирующего температуру. В течение одного эксперимента (~ 6 мин) снимается до 30 кадров, соответствующих различным температурам поверхности электрода.

Вольт-амперные характеристики. Измерительная схема позволяет снимать три вида вольт-амперных характеристик [1]: электрод-зонд, электрод-электрод и стоп-характеристику. Изменение пределов измерения по току и по напряжению дает возможность изменять масштаб осциллограммы. Изменение приложенного напряжения влияет на размах характеристики, не влияя на характерные углы наклона.

Типичная вольт-амперная характеристика электрод-зонд для электродов из силицированного графита имеет вид, представленный на фиг. 2. Ветвь этой характеристики при $j > 0$ ($j = I/S$, где I — ток в цепи электрода, а S — его площадь) соответствует режиму работы электрода в качестве катода (катодная ветвь), при $j < 0$ — в качестве анода (анодная ветвь).



Фиг. 2

Согласно [1], характеристикой анодной ветви осциллограммы может служить $\text{tg } \alpha = \Delta U_a / I \approx R_a$, где R_a — сопротивление слоя газа между электродом и зондом. Катодная ветвь осциллограммы имеет три характерных участка [1]: участок OA характеризуется уровнем токов j^* , соответствующих точке A ; участок AB — величиной $\text{ctg } \alpha_k = \text{tg } \beta$; участок $BB'C$ — катодным падением U , ниже которого не наблюдается

дуговой режим катода. Исследование [2] разряда в условиях, соответствующих этой части характеристики, показало, что в этой области разряд носит дуговой характер с четко выраженными пятнами.

На фиг. 3 для тех же материалов приведен общий вид вольт-амперной характеристики электрод-электрод. Поскольку процессы вблизи катода играют в канале определяющую роль, обе ветви характеристики электрод-электрод качественно аналогичны по структуре катодным ветвям характеристики электрод-зонд.

Если характеристика электрод-электрод снимается в присутствии магнитного поля, необходимо сделать поправку на величину индуцированной э.д.с.

Измерение сопротивлений. Сопротивления межэлектродного промежутка и изоляционных стенок, включенные параллельно (фиг. 4, где 1 — катод, 2 — слой катодного падения потенциала, 3 — пограничный слой у катода, 4 — ядро потока, 5 — пограничный слой у анода, 6 — слой анодного падения потенциала, 7 — анод, 8 — зонд), могут быть определены в отдельности при обработке характеристик.

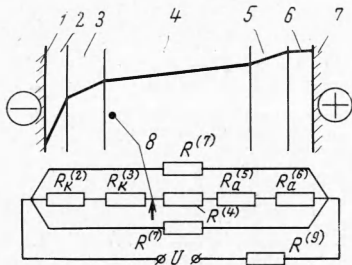
Наличие последовательно снятых с достаточно малым промежутком времени вольт-амперных характеристик электрод-зонд и электрод-электрод позволяет судить об общем сопротивлении промежутка.

Схема токов, перетекающих между электродами при работающем плазмотроне, показана на фиг. 4. Для учета токов, перетекающих по изоляционным стенкам, в момент остановки плазмотрона при приложении к рабочим электродам напряжения снимается вольт-амперная характеристика «стоп», угол наклона которой к оси тока характеризует сопротивление изоляции между электродами.

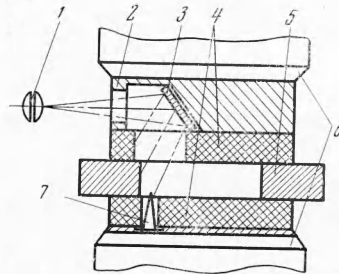
Обработка характеристик. На фиг. 2 показана схема перестроения вольт-амперной характеристики. Падения потенциала на участке электрод-зонд в случае работы исследуемого электрода в качестве катода или анода определяются сопротивлениями

$$R_{k,a} = \Delta U / I', \quad R_k = R_k^{(2)} + R_k^{(3)}, \quad R_a = R_a^{(2)} + R_a^{(3)}$$

Здесь ΔU — падение потенциала на участке между исследуемым электродом и зондом; I' — ток в цепи электродов за вычетом токов, протекающих по изоляции;



Фиг. 4

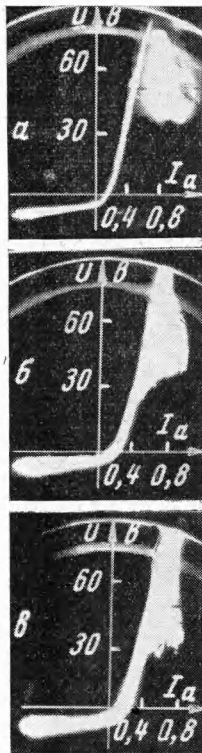


Фиг. 5

$R^{(2)}$ — отношение анодного или катодного падения потенциала к току; $R^{(3)}$ — сопротивление слоя газа между электродом и зондом. Индексы k и a означают, что исследуемый электрод работает в качестве катода или анода.

Если принять, что $R_k^{(3)} = R_a^{(3)}$ и на основании [2] считать $R_a^{(2)}$ пренебрежимо малой величиной при тех плотностях тока, которые были зарегистрированы в экспериментах, то можно сказать, что $R_a = R_a^{(3)} = R_k^{(3)}$.

Таким образом, вычитая из линии $NOA''K$ (фиг. 2) падения напряжения на сопротивлении R_a при заданных значениях I , получим линию OAL , которая представляет



Фиг. 6

собой характеристику зависимости катодного падения потенциала от плотности тока.

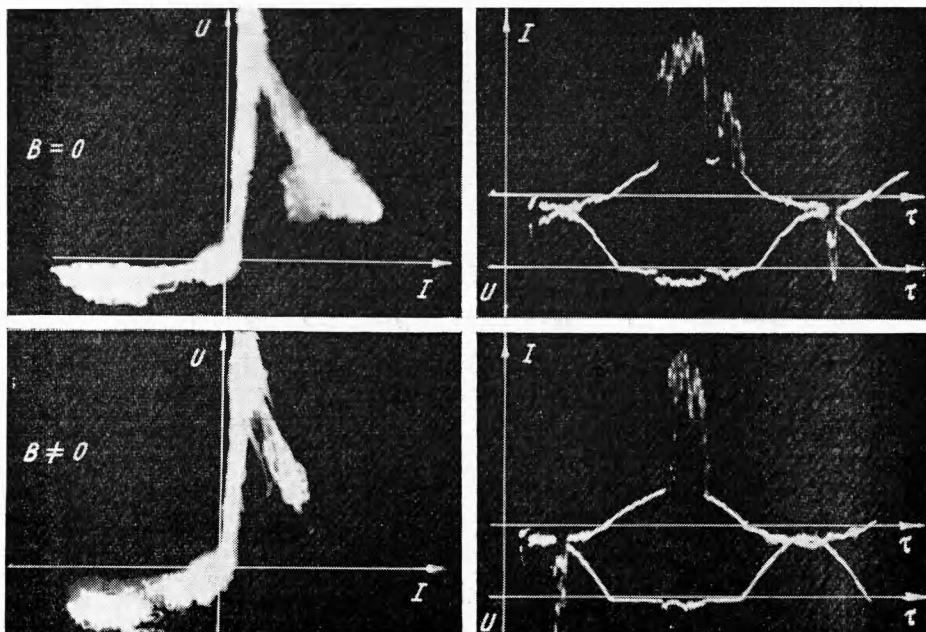
Регистрация дуговых пятен. Киносъемка производится камерой «Pentazet-35» с частотой 2000 сек^{-1} . Контроль скорости съемки и определение длительности жизни пятен производятся по отметкам времени, нанесенным с частотой 1000 сек^{-1} .

Для съемки выбрана пленка 15-ТТ-800, обладающая меньшей по сравнению с пленками типа КН, начальной плотностью ($D_0 = 0.24$), более высоким при аналогичной обработке коэффициентом контрастности ($\gamma = 1.6$) и более высокой максимальной плотностью ($D_{\text{max}} = 3.0-3.2$). Экспозицию следует выбирать так, чтобы оптическая плотность пятен на негативе всегда лежала на пороге D_{max} , что позволит отличить случайно возникающие на поверхности электрода раскаленные частицы от дуговых пятен.

Дуги на поверхности катода зарегистрированы как при отсутствии магнитного поля [2], так и в экспериментах с приложенным магнитным полем. В последнем случае для обзора поверхности электрода в теле башмака магнита установлено (фиг. 5) зеркало с внешним отражающим слоем. Использование зеркала позволило направить ось съемки вдоль поверхности электрода, для изучения структуры дугового разряда.

При выборе масштаба съемки принято во внимание следующее: с увеличением масштаба резко падает глубина резкого изображения пространства, с уменьшением диаметра действующего отверстия объектива падает разрешающая способность оптической системы. Поэтому диафрагмирование объектива до величины 8—11 следует считать предельным.

Предварительно масштаб выбирался из соображений, что на негативе пятно должно иметь размеры на два-три порядка больше собственного зерна негатива. В этом случае масштаб должен быть в диапазоне от 1 : 4 до 1 : 1.



Фиг. 7

Зеркало, установленное под углом $47-48^\circ$ к горизонтальной оптической оси, позволило наблюдать поверхность электрода под углом в $2-3^\circ$. Зона резкости выбрана в средней части электрода и при масштабе съемки $\sim 1 : 2$ составила $\sim 5 \text{ мм}$.

Окончательно масштаб съемки можно определить при помощи следующей формулы:

$$G = 0.066 nM (M + 1)$$

Здесь G — глубина резкоизображаемого пространства; n — относительное отверстие объектива, M — величина, обратная масштабу (отношение линейных размеров картинной плоскости к линейным размерам кинокадра).

Результаты экспериментов. Типичные вольт-амперные характеристики представлены на фиг. 3, 6, 7. Для сравнения сопоставляются характеристики, снятые при одинаковых температурах поверхности электрода и концентрациях присадки. Фиг. 6 показывает, что частота приложенного напряжения не оказывает влияния на вид характеристик. Следовательно, процессы, происходящие вблизи электрода, приходят в стационарное состояние за время значительно меньшее, чем продолжительность одного периода. Это утверждение относится к режиму распределенного разряда. При дуговом разряде стационарное состояние не наступает, пульсации тока и напряжения определяются, по-видимому, динамикой взаимодействия столба дуги с потоком газа.

На фиг. 7 сравниваются характеристики при различной величине магнитного поля. В пределах точности эксперимента не удается обнаружить влияние магнитного поля (1.3—1.5 тл) на вид характеристик. Кинограммы свидетельствуют, что и внешне характер дугового разряда не меняется при включении магнитного поля.

На основании изложенного можно сделать вывод, что для исследования работы электродов допустимо использовать упрощенную методику, предусматривающую приложенное к электродам напряжение частотой 50 гц, в отсутствие магнитного поля. Тем самым облегчается исследование электродов из различных материалов в широком диапазоне температур и концентраций присадки.

Некоторые результаты исследований, проведенных по упрощенной методике, приведены на фиг. 8, где представлена зависимость параметра j^* от T_w и ψ для различных материалов. Эмпирические формулы, описывающие эту зависимость, выглядят так:

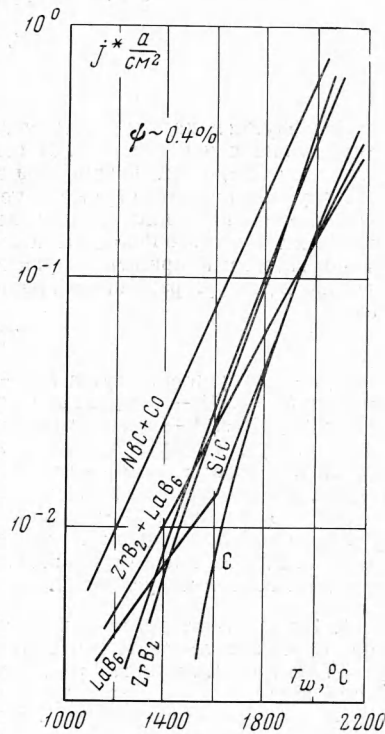
$$j^* = a \exp \{ b T_w \}$$

Приведем значения констант a [$a/\text{см}^2$] и b [град^{-1}] для некоторых материалов. В скобках указаны значения количества присадки калия в потоке воздуха (в %):

$NbC + C_0$	(0.4 k)	$a = 2.2 \cdot 10^{-5}$	$b = 5.06 \cdot 10^{-3}$
	(1.2 k)	$a = 1.6 \cdot 10^{-4}$	$b = 4.25 \cdot 10^{-3}$
ZrB_2	(0.4 k)	$a = 1.5 \cdot 10^{-6}$	$b = 6.14 \cdot 10^{-3}$
	(1.2 k)	$a = 6.6 \cdot 10^{-7}$	$b = 7.06 \cdot 10^{-3}$
$ZrB_2 + LaB_6$	(0.4 k)	$a = 2.8 \cdot 10^{-3}$	$b = 4.26 \cdot 10^{-3}$
	(1.2 k)	$a = 1.1 \cdot 10^{-4}$	$b = 3.84 \cdot 10^{-3}$
W	(1.2 k)	$a = 7.4 \cdot 10^{-5}$	$b = 4.06 \cdot 10^{-3}$
	(1.2 k)	$a = 1.6 \cdot 10^{-5}$	$b = 5.57 \cdot 10^{-3}$

В отличие от этих материалов для гексаборида лантана формула имеет вид

$$j^* = 0.014 + 1.12 \cdot 10^{-44} T_w^{13.96} a / \text{см}^2$$



Фиг. 8

Поступила 29 II 1968

ЛИТЕРАТУРА

- Герман В.О., Морозов М.Г. Плазмотрон постоянного тока и некоторые результаты исследования его работы. Теплофизика высоких температур, 1965, № 5.
- Герман В., Любимов Г.А., Парфенов Б.В. Экспериментальное исследование работы электрода в потоке воздуха, содержащего присадку калия. Теплофизика высоких температур, 1967, № 3.