

04

© 1991 г.

## СТРУКТУРА ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ ДИАФРАГМЕННОГО РАЗРЯДА В ВАКУУМЕ И ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ ОТВЕРСТИЯ ДИАФРАГМЫ НА ЕЕ СВОЙСТВА

*Е. В. Калачников, П. Н. Роговцев*

Проведены экспериментальные исследования влияния размеров отверстия плазмообразующей диафрагмы из текстолита диафрагменного разряда на струях в вакууме ( $p_{\text{vac}} = 13.3-1.33$  Па) на термодинамические и излучательные свойства плазмы струи разряда, истекающей из отверстия, в широком диапазоне изменения геометрии отверстия (толщины диафрагмы  $2l = 2.0-20.0$  мм и диаметра отверстия  $2r = 2.0-12.0$  мм) при фиксированном электропитании разряда. Рассмотрены особенности формирования газодинамической структуры струи разряда на различных фазах его развития. Выбраны оптимальные соотношения размеров отверстия для практических применений изучаемого разряда как источника плазмы и света. Установлен эффект замедления роста значений давления и температуры в струе при увеличении толщины  $2l$  при неизменном диаметре отверстия диафрагмы  $2r$ .

### Введение

В работах [1-4] проводились экспериментальные исследования диафрагменного разряда на струях плазмы, когда динамика плазмы в отверстии плазмообразующей диафрагмы и в струях в значительной степени зависела от влияния магнитных полей и сил.

Целью данной работы являлись изучение влияния размеров отверстия диафрагмы на термодинамические и излучательные свойства плазмы, истекающей из отверстия струи диафрагменного разряда в вакуум, а также особенностей формирования газодинамической структуры струи такого типа разряда на различных фазах его развития и выбор оптимального соотношения размеров цилиндрического отверстия (диаметра  $2r$  и толщины диафрагмы  $2l$ ) с точки зрения однородности струи и интенсивности излучения осевой зоны на квазистационарной фазе для практических применений.

### Экспериментальная установка

Разряд формировался в вакуумной камере 50 л через отверстие в плазмообразующей диафрагме между кольцевыми электродами с электропитанием от конденсаторной батареи с параметрами контура  $U_0 = 5$  кВ,  $C_0 = 2.8$  мФ,  $L_k = 5.6$  мкГ,  $R_k = 1.9$  мОм. Материалом диафрагмы служил текстолит марки ПТК ( $C_{37}H_{47}O_{16}$ ) с изменением диаметра цилиндрического отверстия  $2r$  в диапазоне 2.0-12.0 мм и толщиной  $2l = 2.0-20.0$  мм. Диаметр отверстия в кольцевых электродах из графита равнялся 40 мм. Расстояние от середины диафрагмы до кольцевого катода составляло 5.0 см, а до кольцевого анода 3.0 см.

На многоканальном диагностическом комплексе [2, 3] регистрировались одиночные импульсы тока длительностью 400 мкс с амплитудой тока 50 кА. Коэффициент согласования источника питания и разряда составлял 0.6. Сила тока разряда и производная тока разряда регистрировались с помощью поясов Роговского, а измерение падения напряжения на разрядном промежутке прово-

дилось с помощью двух емкостных делителей напряжения. Осциллографическая аппаратура и схема синхронизации запуска диагностических каналов и разряда помещена в экранированные боксы.

Фотографирование временных разверток спектров излучения струи разряда и интегральных спектров в УФ и видимой областях проводилось на дифракционном спектрографе ДФС-452 совместно с приставкой СП-452 (дисковый спектрохронограф) в направлении, перпендикулярном оси разряда. Для получения разверток спектров в различных точках плазменной струи (излучение снималось с области размером 1.0 мм) разрядное устройство имело возможность перемещаться в двух взаимно перпендикулярных направлениях и поворота на углы  $\mp 90^\circ$ . Интегральные спектры излучения сняты как вдоль оси разряда, так и поперек струи в трех ее сечениях (приустьевом, срединном и прикатодном).

Кроме фотографирования спектров было проведено осциллографирование интенсивности излучения в диапазоне  $\lambda = 200-250$  нм с помощью фотоэлемента ФЭ-7. Изображение струи плазмы проецировалось на промежуточную диафрагму

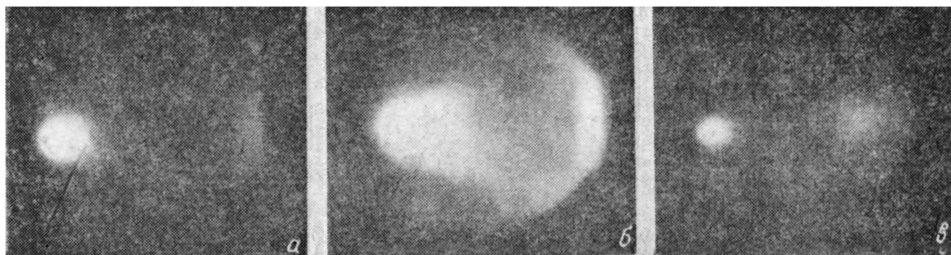


Рис. 1. Кинокадры динамики развития диафрагменного разряда в вакууме (катодная струя плазмы,  $\lambda_{\text{макс}} = 380$  нм,  $t_{\text{экс}} = 16.7$  мкс).

*a* —  $t_{\text{I}} = 32$  мкс, стартовая фаза; *b* —  $t_{\text{II}} = 96$  мкс, квазистационарная фаза; *c* —  $t_{\text{III}} = 288$  мкс, фаза затухания разряда.

с диаметром отверстия 1.2 мм с увеличением  $6\times$ . Осциллографирование интенсивности сплошного фона вблизи  $\lambda = 4047$  Å осуществлялось с помощью ФЭУ-71 с автономным питанием.

Изображение струи плазмы при этом проецировалось на входную щель монохроматора ДМР-4 с увеличением  $1.5\times$  и ограничивалось по высоте 1.5 мм с помощью диафрагмы Гартмана. Осциллографирование интенсивности излучения континуума в области  $\lambda = 1900$  Å велось на усовершенствованном вакуумном монохроматоре ВМР-2 с временным разрешением до  $10^{-7}$  с через осветительную систему с линзой из  $\text{MgF}_2$ , откачиваемую до 1.33 Па. Калибровка фотоэлектрических и фотографических каналов для спектроскопических измерений осуществлялась с помощью стандарта яркости ИСИ-1 с температурой абсолютного черного тела  $T = 40\,000$  К [5].

Давление внутри отверстия плазмообразующей диафрагмы измерялось крещерным методом с использованием динамической тарировки крещерного устройства [6] только для диафрагм толщиной  $2l = 10$  мм. Импульсное давление на периферии струи для расстояний от оси 25–40 мм в срединном сечении определялось с помощью пьезодатчика [7].

Визуализация прозрачных неоднородностей и динамика развития разряда осуществлялись по схеме Теплера на скоростной кинокамере ВФУ-1 через наборы интерференционных фильтров в видимой области спектра с просвечиванием от источника света ИСИ-1 ( $t = 20$  мкс).

### Результаты экспериментов

На протяжении всего времени развития разряда изучалась катодная струя (рис. 1). Выбор катодной части разрядного промежутка связан с тем, что из-за эффекта Холла катодная струя имеет больший диаметральный размер ярко излучающей зоны на протяжении практически всего промежутка диафрагма—

электрод, чем анодная. Это важно при использовании разряда как источника света и плазмы. На квазистационарной фазе развития (50—250 мкс после пробоя разрядного промежутка) катодная струя плазмы при регистрации на скоростной кинокамере ВФУ-1 через интерференционный фильтр с  $\lambda_{\text{макс}} = 400 \pm 5$  нм представляла собой неоднородное образование в виде слаборасходящегося конуса длиной 40 мм, примыкающего к яркой устьевой зоне размером 1.5—2.0 калибра, с плавным снижением яркости в срединном сечении струи и резким повышением непосредственно у катода в зоне торможения на поверхности изоляционного кольца на катоде (рис. 1, б). Основой для анализа газодинамической структуры служили негативные фотографические изображения струи, их динамика во времени, теплерограммы и развертки спектров излучения плазмы струи, а также результаты измерений импульсного давления в отверстии диафрагмы и в оболочке струи, рис. 2.

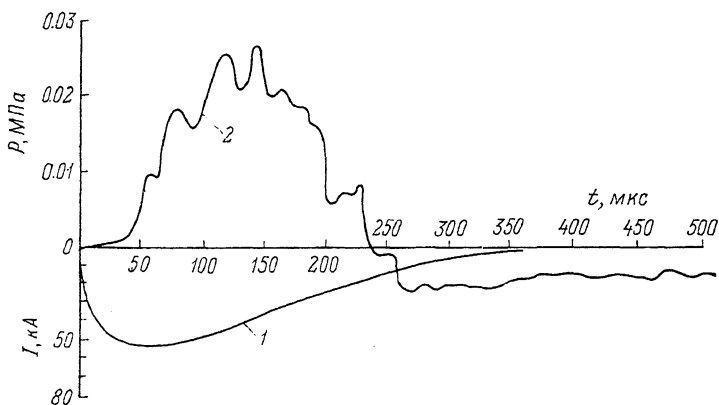


Рис. 2. Осциллограммы импульса тока разряда  $I(t)$  (1) и импульса давления  $P(t)$  (2) в оболочке диафрагменного разряда в вакууме для  $R=40$  мм в срединном сечении ( $z=20$  мм от среза диафрагмы).

На рис. 3 представлены зависимости термодинамических параметров плазмы диафрагменного разряда в вакууме для  $t_{\text{макс}}=90$  мкс на оси разряда в срединном сечении катодной струи от геометрических размеров отверстия в плазмообразую-

Таблица 1

Спектральная интенсивность излучения плазмы на оси диафрагменного разряда в вакууме ( $t_{\text{макс}}=90$  мкс,  $I_{\text{макс}}=48$  кА,  $\lambda=405$  нм)

Геометрические параметры отверстия в диафрагме		На срезе отверстия диафрагмы	В срединном сечении катодной струи
$2l$ , мм	$2r$ , мм	$B_{\lambda}$ , эрг/см <sup>2</sup> · с · ср · нм	$\Gamma_{\lambda}$ , эрг/см <sup>2</sup> · с · ср · нм
2	2	$7.3 \cdot 10^9$	$3.8 \cdot 10^7$
	4	$5.1 \cdot 10^9$	$3.2 \cdot 10^7$
	8	$2.9 \cdot 10^9$	$2.8 \cdot 10^7$
	12	$1.1 \cdot 10^9$	$1.2 \cdot 10^7$
5	4	$5.9 \cdot 10^9$	$4.2 \cdot 10^7$
	8	$4.5 \cdot 10^9$	$2.1 \cdot 10^7$
	12	$1.3 \cdot 10^9$	$1.3 \cdot 10^6$
8	4	$5.4 \cdot 10^9$	$4.0 \cdot 10^7$
	8	$4.0 \cdot 10^9$	$2.1 \cdot 10^7$
10	4	$5.8 \cdot 10^9$	$3.8 \cdot 10^7$
	6	$4.3 \cdot 10^9$	$3.2 \cdot 10^7$
	12	$1.1 \cdot 10^9$	—
20	8	$3.7 \cdot 10^9$	$3.2 \cdot 10^7$
	12	$1.1 \cdot 10^9$	$6.2 \cdot 10^6$

щей диафрагме — диаметра отверстия  $2r$  и толщины диафрагмы  $2l$ . Термодинамические параметры определены методом расчета характеристик многокомпонентной кратиопонизованной плазмы, изложенным в работе [8] и реализованным в программе для ПЭВМ. При расчете использовался численный метод решения системы уравнений Саха совместно с условиями электронейтральности

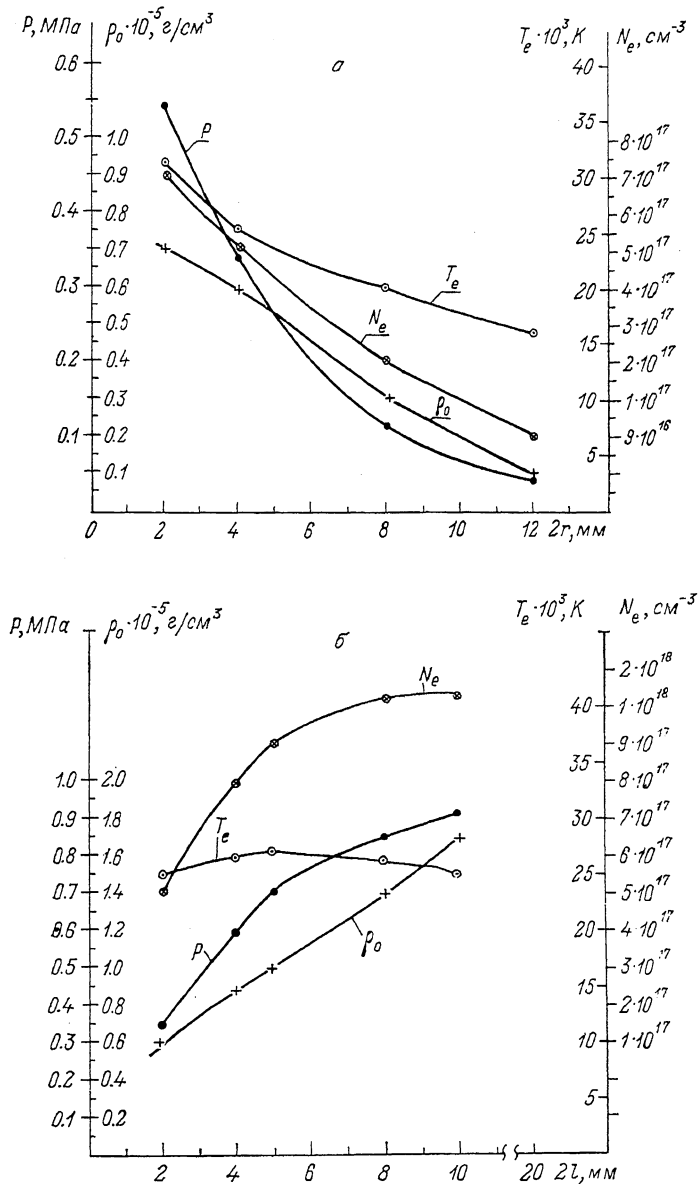


Рис. 3. Зависимости термодинамических параметров плазмы диафрагменного разряда в среднем сечении катодной струи ( $z=20$  мм от среза диафрагмы) от геометрических размеров отверстия в плазмообразующей диафрагме — диаметра отверстия  $2r$  и толщины диафрагмы  $2l$ .

а —  $2l=2.0$  мм, б —  $2r=4.0$  мм.

и стехиометрии многокомпонентной плазмы из текстолита  $\text{C}_{37}\text{H}_{47}\text{O}_{16}$ . Для повышения точности базисом служили концентрации ионов каждого сорта, значения которых максимальны для плазмы с заданными температурой  $T_e$  и концентрацией  $N_e$ . При расчете статистических сумм вычисление производилось с учетом ограничения, накладываемым условием дебаевского экранирования. Для вычисления термодинамических параметров плазмы струи в условиях равновесия использовались экспериментально определенные спектроскопическими мето-

дами — методом относительных интенсивностей линий ионов  $\text{CIII } 4647.4 \text{ \AA}$  и  $\text{CII } 2992.6 \text{ \AA}$  [9, 10] и по штарковскому уширению контура линии иона  $\text{CII } 2992.6 \text{ \AA}$  [11, 12] соответственно температура электронов  $T_e$  и концентрация электронов  $N_e$ .

В табл. 1 приведены результаты по измерению излучательных свойств плазмы разряда на оси у среза отверстия диафрагмы и в срединном сечении катодной струи.

Т а б л и ц а 2

Термодинамические параметры плазмы в середине отверстия диафрагмы на оси для разряда в вакууме ( $t_{\text{макс}} = 90 \text{ мкс}$ ,  $I_{\text{макс}} = 48 \text{ кА}$ )

Геометрические параметры отверстия в диафрагме		Плотность тока в отверстии диафрагмы, $j$ кА/см <sup>2</sup>	Температура $T_0 \cdot 10^3$ , К	Давление $P_0$ , МПа	Плотность $\rho_0 \cdot 10^{-4}$ , г/см <sup>3</sup>	Энтальпия $H_0$ , кДж/г
$2l$ , мм	$2r$ , мм					
2*	2	1500	70	110	2.8	1050
	4	380	48	20.7	0.64	719
5*	2	1500	50	Разрыв 28.6	Диафрагмы 0.89	731
	4	380				
10**	2	1500	48 $T_{\text{ярк}} = 36 \cdot 10^3 \text{ К}$	Разрыв 69.3 $P_{\text{крен}} = 13.5 \text{ МПа}$	Диафрагмы 2.9 0.72	650 500
	4	380				
	6	170				
20**	4	380	$T_{\text{ярк}} = 33 \cdot 10^3 \text{ К}$ $T_{\text{ярк}} = 26 \cdot 10^3 \text{ К}$	Разрыв $P_{\text{крен}} = 10.9 \text{ МПа}$ $P_{\text{крен}} = 3.1 \text{ МПа}$	Диафрагмы 0.76 0.28	427 346
	8	90				
	12	40				

Примечание. Значения \*  $T_0$ ,  $P_0$ ,  $\rho_0$  и  $H_0$  определены по зависимостям, приведенным в [1] на основе измеренных  $I_{\text{макс}}$ ,  $2r$ ,  $2l$ , а значения \*\*  $\rho_0$  и  $H_0$  — по методике, описанной в работе [1], на основе измеренных  $P_{\text{крен}} = P_0$  и  $T_{\text{ярк}} = T_0$  для  $\lambda = 405 \text{ нм}$ .

В табл. 2 приведены расчетные значения термодинамических параметров плазмы в отверстии диафрагмы на оси, полученные на основе аппроксимирующих выражений, приведенных в [4] (обозначены звездочкой), а также расчетные значения, полученные по методике [8], по измеренным экспериментально — фотоэлектрическим методом температуры плазмы  $T_{\text{ярк}}$  на срезе отверстия вблизи  $\lambda = 4047 \text{ \AA}$  и с помощью крешерной методики [6] давления  $P_{\text{макс}}$  в срединном сечении отверстия диафрагмы (обозначены двумя звездочками).

### Обсуждение результатов

Длительность начальной фазы определялась из условия окончания (после переходных процессов при пробое промежутка) формирования осесимметрично яркоребристой вблизи оси струи за счет ее обжатия магнитными силами. Экспериментально определяемая длительность начальной фазы составляла 20—50 мкс и слабо зависела от вариации геометрических размеров отверстия диафрагмы.

Длительность квазистационарной фазы определялась при сохранении общей картины истечения с характерными элементами структуры, совпадением экспериментально полученной зависимости временного хода температуры и концентрации электронов струи в осевой зоне от тока на переднем и заднем фронтах импульса тока (рис. 4) и составляет 200—250 мкс.

Газодинамическая структура катодной струи разряда на основании нетативных изображений при скоростной съемке и спектров струи (рис. 1, б, 2) соответствуетначальному участку недорасширенных затопленных струй [10, 13]. Число Рейнольдса, обычно используемое в качестве критерия, характеризующего режим течения плазменной струи [13], для течения плазмы в устье на срезе диафрагмы составляло

$$\text{Re}_* = \frac{\rho_* \cdot v_* \cdot (2r)_*}{\mu_*} = 2.3 \cdot 10^5,$$

где плотность, скорость потока, характерный размер и вязкость в критическом сечении соответственно равны  $\rho_* = 0.89 \cdot 10^{-4}$  г/см<sup>3</sup>,  $v_* = c_* = 13.1 \cdot 10^5$  см/с,  $(2r)_* = 0.4$  см,  $\mu_* = 2 \cdot 10^{-4}$  г/см·с.

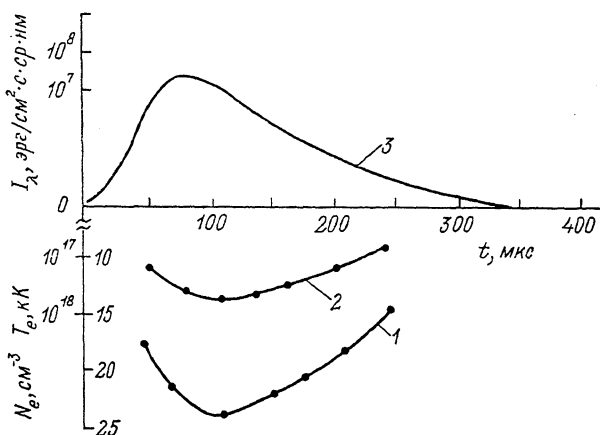


Рис. 4. Временные зависимости температуры  $T_e$  (1) и концентрации электронов  $N_e$  (2) и яркостной температуры  $T_{sp}$  (3) на  $\lambda = 4047$  Å в осевой зоне катодной струи на  $z = 20$  мм от среза диафрагмы.

Число Рейнольдса в срединном сечении струи на расстоянии  $z = 20$  мм от среза диафрагмы для осевой и приосевой зон различны: для осевой зоны  $Re_I = 8.5 \cdot 10^4$ , где  $\rho_I = 0.1 \cdot 10^{-4}$  г/см<sup>3</sup>;  $v_I = c_I = 8.5 \cdot 10^5$  см/с;  $(2r)_I = 2.0$  см;  $\mu_I =$

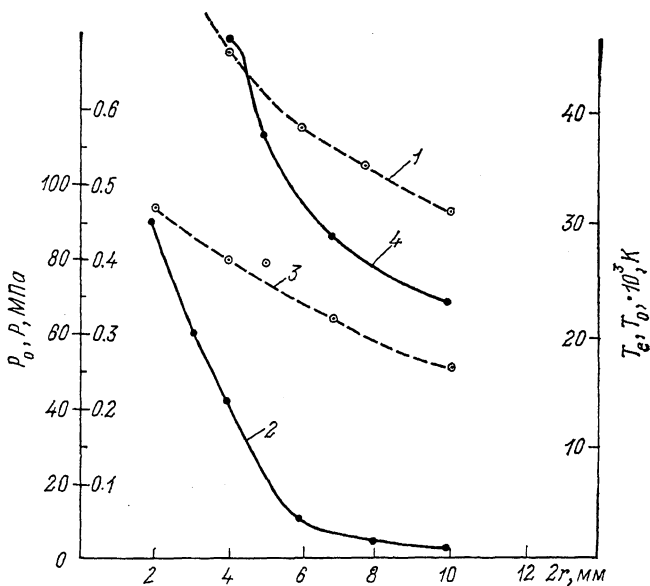


Рис. 5. Термодинамические характеристики диафрагменного разряда на струях при  $I_{\text{макс}} = 4800$  А и  $2r/2l = 1.0$  в отверстии диафрагмы на оси температура  $T_0$  (1) по формулам [4] и давление  $P_0$  (2) по формулам [4], а также срединном сечении катодной струи на оси температура  $T_e$  (3) и давление  $P$  (4).

$I = 48000$  А,  $2r = 2l = 1.0$  мм.

$= 2 \cdot 10^{-4}$  г/см·с; для приосевой зоны  $Re_{II} = 6.4 \cdot 10^2$ , где  $\rho_{II} = 0.01 \cdot 10^{-4}$  г/см<sup>3</sup>;  $v_{II} = c_{II} = 6.4 \cdot 10^5$  см/с;  $(2r)_{II} = 4.0$  см;  $\mu_{II} = 4 \cdot 10^{-4}$  г/см·с. На основании полученных оценок  $Re_I$  и  $Re_{II}$ , характеризующих режим течения струи плазмы на оси и в области свободного расширения, а также плотности тока  $j$  в отверстии и

в струе [3] эти данные по измерению давления среды [2, 3] можно полагать, что газодинамическая структура струи плазмы при прочих равных условиях определяется в основном двумя факторами: распределением плотности тока в сечении струи и разреженностью внешней среды.

Полученные количественные характеристики плазмы струи (рис. 3) свидетельствуют о существенной роли отверстия в диафрагме как расходного сопла для свойств истекающих струй.

Проводя сопоставление термодинамических параметров плазмы на оси в отверстии диафрагмы  $P_0$  и  $T_0$  и в катодной струе  $P$  и  $T_e$  при  $2r/2l=1.0$ , можно видеть качественное соответствие хода температуры электронов на оси в струе  $T_e(2r)$  и в среднем сечении в отверстии диафрагмы  $T_0(2r)$ , а также  $P(2r)$  и  $P_0(2r)$  при постоянной величине тока  $I_{\text{макс}}$  (рис. 5). Опорный режим при  $2l=2r=4.0-5.0$  мм находится в области максимальных значений кривых  $P(2r)$  и  $T_e(2r)$ .

На стадии затухания разряда в кольцевой зоне свободного расширения (приосевая зона) на начальном участке струи (рис. 1, е) регистрируется висячий скачок, не видимый при фотосъемке на квазистационарной фазе разряда. По мере удаления от среза диафрагмы висячий скачок приближается к осевой зоне струи в области диска Маха. Если в качестве критерия, характеризующего режим течения на границе приосевой зоны на начальном участке струи взять число Рейнольдса, в котором характерная длина равна расстоянию от среза диафрагмы до диска Маха (или точки пересечения висячего скачка сплотнения с осью струи [13]), то  $Re_L = Re_* / \sqrt{N} = 5 \cdot 10^4$ , где  $Re_* = 2.7 \cdot 10^4$  — число Рейнольдса в критическом сечении для  $t=280$  мкс, а  $N = P_0/P_\infty = 28$  — степень расширения. Таким образом, по мере спада тока исчезает характерная для квазистационарной фазы резкая граница осевой зоны: характер течения струи продуктов эрозии и ее структура все больше определяются газодинамическими особенностями отверстия диафрагмы как расходного сопла.

### Выводы

Показано, что с увеличением диаметра отверстия  $2r=2-12$  мм при постоянной толщине диафрагмы  $2l$  значения термодинамических параметров плазмы в струе на оси монотонно спадают в пределах порядка измеряемой величины (например, при  $2l=2.0$  мм  $P=0.6-0.1$  МПа,  $\rho=0.7-0.1 \cdot 10^{-5}$  г/см<sup>3</sup>). При увеличении толщины  $2l=2-20$  мм и сохранении диаметра отверстия  $2r$  обнаружен эффект насыщения — замедление роста значений давления и температуры в струе (например, при  $2r=4.0$  мм и  $2l=8-10$  мм  $P=0.8$  МПа,  $T=25 \cdot 10^3$  К,  $N_e=1 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>).

Определено, что при отношении  $2r/2l=1.0$  и  $2r=4-5$  мм значения температуры в осевой зоне струи достигают своего максимального значения  $T_e=27 \cdot 10^3$  К при заданном электропитании. Этот режим может являться опорным для построения источника света и плазмы на основе диафрагменного разряда в вакууме.

В заключение следует отметить, что газодинамическая структура струи на квазистационарной фазе разряда при изменении геометрических размеров отверстия диафрагмы качественно неизменна: в эксперименте наблюдается осесимметричная структура, состоящая из ярко излучающей осевой зоны с резкой границей в континууме и приосевой с плавным спадом интенсивности линейчатого излучения вдоль радиуса на границе с оболочкой разряда.

При  $2r/2l=1.0$  и  $2r=4-5$  мм интенсивность сплошного спектра осевой зоны и ее радиальный размер при заданном энергокладе в разряд ( $E=19$  кДж) максимальны и составляют в среднем сечении катодной струи  $I_\lambda=4 \cdot 10^7$  эрг/см<sup>2</sup>·с·ср·нм для  $\lambda=400$  нм при поперечном размере осевой зоны 12 мм.

### Список литературы

- [1] Огурцова Н. Н., Поджоженский И. В., Шелгина В. М. // ЖТФ. 1975. Т. 45. Вып. 4. С. 2011—2014.
- [2] Калачников Е. В., Роговцев П. Н. // ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 9. С. 1724—1730.
- [3] Калачников Е. В., Роговцев П. Н. // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 4. С. 99—104.

- [4] Белов С. Н., Жилин А. Н., Огурцова Н. Н., Подмошенский И. В. // ТВТ. 1978. Т. 16. № 3. С. 473—481.
- [5] Демидов М. И., Огурцова Н. Н., Подмошенский И. В., Шелемина В. М. // ЖПС. 1975. Т. 23. № 5. С. 957—960.
- [6] Калачников Е. В., Роговцев П. Н. // ПТЭ. 1987. Т. 6. С. 186—189.
- [7] Калачников Е. В., Роговцев П. Н. // ПТЭ. 1989. Т. 5. С. 236—238.
- [8] Романов Г. С., Станциц Л. К., Степанов К. Л. // ЖПС. 1979. Т. 30. № 1. С. 35—43.
- [9] Лохте-Хольтгревен В. Методы исследования плазмы. М., 1971.
- [10] Минько Л. Я. Получение и исследование импульсных плазменных потоков. Минск, 1970.
- [11] Грим Г. Уширение спектральных линий в плазме. М., 1978.
- [12] Курсков А. А., Ершов-Павлов Е. А., Чьялева Л. В. // ЖПС. 1989. Т. 51. № 5. С. 742—746.
- [13] Лукьянов Г. А. Сверхзвуковые струи плазмы. Л., 1985.

Поступило в Редакцию  
21 августа 1990 г.