

УДК 533.907

## ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ИСПАРЕНИЯ МАТЕРИАЛА СТЕНКИ НА СВОЙСТВА ПЛАЗМЫ КАПИЛЛЯРНОГО РАЗРЯДА

*Н. Н. Огурцова, И. В. Подмоиенский, В. М. Шелегина*

В условиях капиллярного разряда с испаряемой стенкой (КРИС) исследовано влияние скорости испарения материала капилляра на параметры плазмы. Вариация скорости испарения достигалась за счет подбора диэлектрических материалов с близким химическим составом, но существенно отличающихся по теплоте испарения или по количеству поглощенной энергии излучения. Экспериментально показано, что характер влияния скорости испарения материала капилляра на параметры плазмы КРИС зависит от ее оптической плотности. В условиях близких к а.ч.т. при фиксированных химическом составе материала и вводимой электрической мощности увеличение скорости испарения в два раза приводит к полуторакратному повышению давления и сжатию канала разряда.

Известно, что в капиллярном разряде с испаряемой стенкой (КРИС) основные свойства плазмы — химический состав, давление и температура — в определенной степени зависят от процесса испарения материала капилляра. При этом в квазистационарном режиме осуществляется авторегулирование, которое уравнивает поток массы и энергии, вводимый в капилляр и уносимый из него плазменными струями. Регулирование потока испаряемой массы осуществляется через пристеночный пограничный слой относительно холодного газа, который выступает как поглощающий светофильтр и ослабляет излучение плазмы канала, идущее на испарение стенки. К постоянному времени достигнутое понимание роли процессов испарения в КРИС фактически ограничивается этими общими соображениями.

В предлагаемой работе рассматривается влияние скорости испарения материала капилляра на характеристики плазмы КРИС. При реализуемых на опыте условиях лучистого теплообмена количество испарившегося вещества определяется его теплотой испарения и величиной энергии излучения плазмы, поглощенной в испарившемся поверхностном слое материала стенки.

Для решения поставленной задачи необходимо было подобрать диэлектрические материалы с близким химическим составом, но существенно отличающиеся по скорости тепловой эрозии. Экспериментально показано, что этим требованиям хорошо удовлетворяют полиэтилен черный и белый  $(C_2H_4)_n$ , а также текстолит  $(C_5H_7O_2)_n$  и полиформальдегид  $(CH_2O)_n$ . В первом случае вариация скорости испарения стенки достигается за счет изменения поглощенной ею энергии излучения, во втором — за счет различия теплот испарения текстолита и полиформальдегида. Следует отметить, что в данном случае за теплоту испарения принимается энергия, затрачиваемая разрядом на преобразование материала стенки в газ при температуре 4000—5000° К, когда по температурным условиям исключено существование сажистых частиц, образующихся при испарении текстолита и полиэтилена и воспринимающих на себя основную тепловую нагрузку.

Проведенные оценки показали, что добавление 2 вес. % сажи при изготовлении черного полиэтилена практически не меняет его теплоты испарения.

Исследование проводилось для хорошо изученного режима источника света ЭВ-45 — разряд с прямоугольной формой тока 10 000 а через капилляр с начальным диаметром 2 мм при длине 10 мм [1]. В этом режиме скорость испарения стенки достигала 30 см/сек и контролировалась по радиальному разгоранию капилляра и его весовому разрушению. Кроме того, определялись температура плазмы на оси разряда, радиальное распределение температуры, вольт-амперные характеристики, диаметр канала разряда. Результаты измерений приведены в таблице. Основные количественные данные получены при сопоставлении параметров разряда через капилляр из текстолита и полиформальдегида.

Параметры разряда, материал	Текстолит C <sub>6</sub> H <sub>7</sub> O <sub>2</sub>	Полиформальдегид, CH <sub>2</sub> O	Фибра, C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O	Полиэтилен чер- ный, C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Полиэтилен бе- лый, C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>
Ток разряда $I$ , а	9000	7700	7000	8000	10 000
Напряжение на разряде $V$ , в	1100	1400	1300		
Вводимая мощность $W$ , вт	$9,9 \cdot 10^6$	$10,8 \cdot 10^6$	$9,1 \cdot 10^6$		
Длительность на уровне 0,9 от амплитуды, сек	$10^{-4}$	$10^{-4}$	$10^{-4}$	$10^{-4}$	$10^{-4}$
Длина капилляра $l$ , мм	10	10	10	10	10
Начальный диаметр капилляра $d_2$ , мм	2,1	2,1	2,0	2,0	2,0
Увеличение $d_2$ за счет разгорания стенки за один импульс, мм	0,08	0,17	0,15	0,14	0,07
Диаметр канала разряда $d_1$ при $T_{гр} = 20\ 000^\circ\text{К}$ , мм	1,9	1,6			
Сечение канала разряда, мм <sup>2</sup>	2,8	2			
Температура плазмы на оси, °К	40 000	40 000	40 000	40 000	40 000
Давление плазмы $p$ , атм	500	750			
Сопротивление канала $R$ , ом расчет	0,11	0,15	0,19		
Разрушение материала за один импульс, г	$4 \cdot 10^{-3}$	—	$7 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$
Удельный вес материала, гсм <sup>-3</sup>	1,4	1,5	1,47	0,99	0,85

Весовое разрушение и разгорание материала стенки получены как результат усреднения действия трех разрядов через один капилляр. Остальные параметры  $d$ ,  $S$ ,  $T$ ,  $P$ ,  $I$ ,  $V$ ,  $W$  относятся к первому импульсу. В случае полиформальдегида весовые измерения не проводились из-за появления небольших отколов на торце под действием разряда. Для полиэтилена увеличение диаметра капилляра после первого импульса превышало разгорание, наблюдаемое при последующих разрядах. Поэтому при определении разгорания полиэтилена первый импульс не учитывался и оно находилось как среднее действие двух последующих разрядов. При расчете сопротивления канала  $R$  для всех материалов удельное сопротивление плазмы полагали постоянным по сечению канала и равным  $3 \cdot 10^{-3}$  омсм [2]. Развивающееся в канале давление в случае разряда через текстолитовый капилляр было измерено ранее [3] и равнялось 500 атм. На значительный рост давления в разряде через капилляр из полиформальдегида указывало наблюдаемое на опыте существенное увеличение интенсивности непрерывного излучения в приторцовой зоне струи. Количественная оценка повышения давления сделана из рассмотрения баланса мощности [2].

Из таблицы видно, что в условиях разряда силой тока 10 000 а через капилляр диаметром 2 и длиной 10 мм при заданном химическом составе материала капилляра увеличение скорости испарения в два раза приводит к уменьшению диаметра канала на 20—25% и соответственно к росту со-

противления и давления примерно в полтора раза. Температура плазмы при этом в пределах погрешности измерения  $\mp 5\%$  сохраняется постоянной.

Качественно наблюдаемые факты следуют из условия, что в квазистационарном режиме КРИС вводимая в канал электрическая мощность равна мощности, отводимой излучением к боковой поверхности и расходуемой на образование плазмы, и мощности, уносимой плазменными струями через открытые торцы.

В условиях абсолютно черного излучателя, которые реализуются во всех обследованных нами режимах (см. таблицу), уравнения баланса мощности приближенно могут быть записаны в виде [4]

$$I^2 R = \sigma T_1^4 \pi d_1 l, \quad I^2 R = 1/2 \rho_{1\text{кр}} v_{1\text{кр}} \Delta H_1 \pi d_1^2.$$

Следует отметить, что в данном случае достигается минимальная температура плазмы, соответствующая заданным диаметру капилляра и вводимой в разряд электрической мощности [3]. Поэтому при повышении плотности плазмы  $\rho_1$  за счет возрастания скорости испарения материала капилляра снижение температуры плазмы  $T_1$ , а также ее энтальпии  $\Delta H_1$  и скорости истечения  $v_1$  практически невозможно, и выполнение уравнений энергетического баланса может быть достигнуто только за счет уменьшения диаметра канала разряда  $d_1$ . При этом соответственно возрастает роль относительно холодного пристеночного слоя в уносе массы испарившегося вещества стенки, и обратно пропорционально корню четвертой степени из отношения диаметров канала возрастает температура плазмы. Согласно проведенным оценкам в условиях опытов возможен рост температуры на 4%, что лежит в пределах погрешности измерения.

Ранее в работе [4] из рассмотрения уравнений баланса энергии КРИС были получены расчетные соотношения, связывающие параметры плазмы, излучающей как абсолютно черное тело, с вводимой электрической мощностью и геометрией канала разряда. При использовании этих соотношений в первом приближении полагали, что диаметр канала разряда  $d_1$  равен диаметру капилляра  $d_2$ , а испарение материала капилляра определяет только атомарный состав плазмы. Как показали данные исследования, в реальных условиях при заданных электрическом режиме  $W = \text{const}$ , геометрии и химическом составе материала капилляра увеличение скорости испарения стенки приводит к возрастанию толщины пограничного слоя, который отводит избыточную массу испарившегося вещества, в результате чего появляется некоторая неопределенность в оценке параметров плазмы КРИС из рассмотрения только баланса энергии. Таким образом, размеры канала и параметры плазмы КРИС наряду с балансом энергии существенным образом определяются балансом массы.

Количество испарившегося материала капилляра пропорционально доле энергии излучения  $\alpha$ , поглощенной в тонком поверхностном слое стенки, обратно пропорционально теплоте испарения материала  $\Delta H_{\text{ст}}$  и в стационарном режиме равно массе, уносимой струями через открытые торцы. В упрощенном случае двухзонной модели уравнение баланса массы можно записать в виде

$$m_1 + m_2 = 1/2 \rho_{1\text{кр}} v_{1\text{кр}} \pi d_1^2 + 1/2 \rho_{2\text{кр}} v_{2\text{кр}} (\pi d_2^2 - \pi d_1^2) = \alpha \sigma T_1^4 \pi d_1 l / \Delta H_{\text{ст}},$$

где индекс 1 относится к параметрам плазмы канала разряда диаметром  $d_1$ , ответственного за отвод массы и мощности, а индекс 2 — к относительно холодному (температура  $\sim 4000 - 5000^\circ \text{K}$ ) пограничному слою, ответственному только за унос массы. Совместное решение уравнений баланса энергии и массы (в дополнение к полученным ранее соотношениям [4]) дает связь геометрии канала и параметров плазмы с количеством испарившегося вещества стенки, пропорциональным  $\alpha / \Delta H_{\text{ст}}$ , а также соотношение меж-

ду величинами  $m_2$  — уносом массы через зону пограничного слоя и  $m_1$  — через область плазмы

$$\frac{5,67\alpha T_1}{\Delta H_{\text{cr}}} - 0,567 = 1,2 \frac{d_2 - d_1}{d_1} \sqrt{\frac{\mu_2}{\mu_1}} \sqrt{\frac{T_1}{T_2}},$$

$$\frac{m_2}{m_1} = 2 \frac{d_2 - d_1}{d_1} \sqrt{\frac{\mu_2}{\mu_1}} \sqrt{\frac{T_1}{T_2}} = 10 \left( \frac{\alpha T_1}{\Delta H_{\text{cr}}} - 0,1 \right),$$

при этом рассмотрение выполнено для плазмы с атомным составом, соответствующим химическому символу  $\text{CH}_2\text{O}$ .

Из полученных выражений видно, что увеличение скорости испарения материала капилляра как за счет повышения доли поглощенной им энергии излучения  $\alpha$ , так и за счет снижения теплоты испарения  $\Delta H_{\text{cr}}$ , приводит к сжатию канала и повышению роли пограничного слоя в уносе массы испарившегося вещества, что в действительности и наблюдается на опыте.

Проведенное рассмотрение касается случая абсолютно черного излучателя. При уменьшении оптической плотности плазмы повышение давления за счет возрастания скорости испарения материала капилляра неизбежно будет сопровождаться снижением температуры, энгалгии и скорости истечения плазмы, что должно в значительной степени уменьшить сжатие канала разряда. Ставились специальные опыты по исследованию влияния скорости испарения материала капилляра на параметры плазмы при более низких давлениях. Снижение давления плазмы достигалось за счет уменьшения длины капилляра в пределах 1—10 мм. При этом подводимая к единице длины канала электрическая мощность сохранялась постоянной, падала излучательная способность плазмы и возрастала ее температура [3]. Проведенные исследования показали, что в случае разряда через капилляры длиной  $< 5$  мм обнаруженное ранее двукратное увеличение скорости разрушения полиформальдегида и фибры по сравнению с текстолитом, а также черного полиэтилена по сравнению с белым, не наблюдается, и смена материала практически не влияет на параметры плазмы и геометрию канала КРИС. Можно думать, что в этих режимах пограничный слой выступает как авторегулятор потока тепла на стенку. Качественные предпосылки к такому выводу есть, поскольку при высокой температуре и малой излучательной способности плазмы за испарение стенки ответственно в основном коротковолновое излучение вблизи полосы поглощения газа пограничного слоя, на что указывает отсутствие различия в разрушении черного и белого полиэтилена. В промежуточной области  $l \approx 5$  мм отличие излучения канала от излучения а.ч.т. невелико, так что увеличение скорости испарения полиформальдегида, фибры и черного полиэтилена сохраняется, но не приводит к существенному сжатию канала разряда, а сопровождается лишь некоторым понижением температуры плазмы.

Результаты проведенной работы можно обобщить следующим образом. Характер влияния испарения материала капилляра на параметры плазмы КРИС зависит от ее оптической плотности. В условиях близких к абсолютно черному излучателю при фиксированных вводимой электрической мощности и химическом составе материала капилляра эрозия внутренней стенки определяется ее оптическими и теплофизическими свойствами. Увеличение скорости испарения капилляра как за счет доли поглощенной им энергии, так и за счет снижения теплоты испарения приводит к росту давления и сжатию канала разряда. При этом масса дополнительно испарившегося вещества уносится главным образом потоками газа через существенно возросший пограничный слой. При малой оптической плотности плазмы канала пограничный пристеночный слой выступает как авторегу-

лятор лучистого потока тепла на стенку, и скорость ее испарения задается только подводимой к разряду электрической мощностью и химическим составом материала капилляра.

Ленинград

Поступила в редакцию  
30 X 1972

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *М. И. Демидов, Н. Н. Огурцова, И. В. Подмошенский.* Оптико-механ. промышленность, № 1, 1, 1960.
  2. *Н. Н. Огурцова, И. В. Подмошенский, В. М. Шелемина.* Теплофизика высоких температур, 6, 400, 1968.
  3. *Н. Н. Огурцова, И. В. Подмошенский, В. М. Шелемина.* Теплофизика высоких температур, 6, 48, 1968.
  4. *Н. Н. Огурцова, И. В. Подмошенский, П. Н. Роговцев.* Теплофизика высоких температур, 9, 468, 1971.
-