

УДК 537.52

## НЕКОТОРЫЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ФАКЕЛЬНОГО РАЗРЯДА

И. А. ТИХОМИРОВ, В. Л. ТЕПЛОУХОВ, В. А. ВЕРНЯЕВ,  
Вик. Л. ТЕПЛОУХОВ, А. Г. КАРЕНГИН, С. М. ГОГЛЕВ

(Представлена научным семинаром физико-технического факультета)

Экспериментально изучено распределение мощностей в системе высокочастотный генератор — высокочастотный факельный разряд средней мощности при атмосферном давлении. Получены значения к.п.д. и  $\cos \varphi$  в разряде. Определены величины активного сопротивления и емкости высокочастотного факельного разряда. Рассчитано число эффективных столкновений электронов с тяжелыми частицами в канале в.ч. факельного разряда. Показано, что электрофизические параметры факельного разряда в сильной степени зависят от величины мощности, подводимой к разряду.

Иллюстраций 6, таблиц 4, библиографий 5.

В последнее время большое внимание уделяется изучению низкотемпературной плазмы газовых разрядов и, в частности, плазмы высокочастотного факельного разряда. Ряд особенностей этого разряда делает его весьма перспективным

для различных областей химической технологии. Отсюда становится понятным вся важность пристального изучения особенностей поведения этого разряда, характеристик и свойств его, процессов, определяющих его возникновение и устойчивое существование. Выяснению некоторых экспериментальных характеристик и физических свойств высокочастотного факельного разряда и посвящена данная работа.

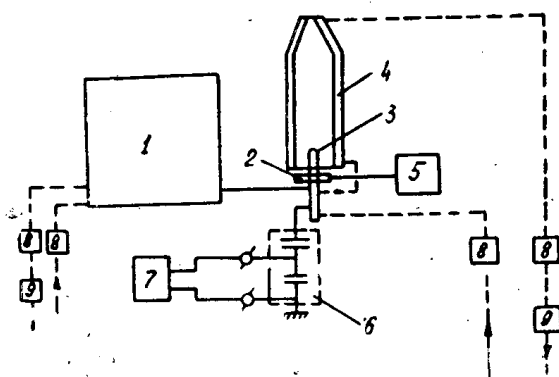


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 — высокочастотный генератор ЛГД-12; 2 — пояс Роговского; 3 — электрод; 4 — плазмотрон; 5 — катодный вольтметр типа «Орион»; 6 — делитель напряжения ДНЕ-6; 7 — катодный вольтметр типа «Орион»; 8 — датчик температуры; 9 — датчик расхода воды.

Существующая по данному вопросу литература, как правило, освещает исследования, проводившиеся с высокочастотным факельным разрядом малой мощности [1, 2].

При этом тепловая мощность разряда составляла от нескольких десятков до одной-двух сотен ватт, а геометрическая длина факела была порядка нескольких сантиметров [1, 2, 3]. Однако для промышленного применения нужны разряды значительно более высоких мощностей. В этой связи понятен интерес, проявляемый нами к исследованию разрядов повышенной мощности от 1 до нескольких десятков киловатт.

Схема экспериментальной установки для проведения исследований представлена на рис. 1. В качестве источника высокочастотной энергии использовался промышленный высокочастотный генератор ЛГД-12 (1) с колебательной мощностью 12 квт и рабочей частотой 20—25 мгц. Высокочастотный факельный разряд возбуждался в медном плазмотроне с водяным охлаждением стенок. В эксперименте измеряли количество энергии, выделяющееся в плазмотроне и на аноде генераторной лампы. Замерялось напряжение на электроде при помощи катодного вольтметра марки «Орион», подключенного через стандартный делитель напряжения типа ДНЕ-6. Ток в разряде измерялся при помощи высокочастотного трансформатора тока. Напряжение на аноде генераторной лампы измерялось электростатическим вольтметром типа С-96. Полученные результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

№ п. п.	Анодный ток	Напряжение на аноде $U_a$	Мощность от выпр. $P_B$	В. ч. напр. на электр. $U_{\sim}$	В. ч. ток разряда $I_{\sim}$	Ток сетки $I_c$	Калориметрирование разряда			Калориметрирование анода		
							$t_0$	$t$	$Q$	$t_0$	$t$	$Q$
	$a$	квт	квт	кв	$a$	$a$	°С	°С	г/сек	°С	°С	г/сек
1	1,05	4,32	4,65	1,30	1,16	0,08	3	9,5	20	3	9	148
2	1,20	4,30	5,15	1,30	1,22	0,09	3	11,5	19,2	3	9,5	148
3	1,40	4,25	6,0	1,25	1,35	0,1	3	13,5	17,8	3	10,5	148
4	1,70	4,25	7,25	1,25	1,62	0,12	3	16	15,6	3	12	148
5	1,95	4,25	8,55	1,20	1,90	0,13	3	19	13,5	3	14	148

Результаты измерений позволяют рассчитать важные энергетические и электрофизические характеристики разряда и проследить их изменение с изменением мощности разряда. Воспользовавшись рядом известных формул, можем оценить тепловую мощность  $P_T = Q \cdot c \cdot \Delta T$ , выделяемую в разряде; полную мощность  $P_{\phi} = \frac{I_{\sim} U_{\sim}}{2}$ , подводимую к разряду; а также колебательную мощность в. ч. генератора  $P_K = P_B - P_A$ . Здесь  $P_B$  — мощность выпрямителя высокочастотного генератора,  $P_A$  — мощность потерь на аноде. Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Таблица 2

№ п.п.	Мощность от выпрямителя $P_B$	Мощность потерь на аноде $P_A$	Колебательная мощность $P_K$	Полная мощность в разряде	Тепловая мощность в разряде $P_T$	К. п. д. в. ч. контур-разряд $\eta$	$\cos \varphi$
	квт	квт	кв	кв	квт		
1	4,65	3,86	0,87	0,76	0,54	0,62	0,71
2	5,15	4,00	1,15	0,78	0,68	0,6	0,86
3	6,0	4,7	1,5	0,85	0,8	0,53	0,94
4	7,25	5,6	1,65	1,02	0,85	0,51	0,84
5	8,55	6,8	1,7	1,18	0,91	0,52	0,68

на основе которой построены кривые, показывающие изменение распределения мощностей с ростом нагрузки генератора рис. 2. Заштрихованная часть на графике показывает величину колебательной мощности.

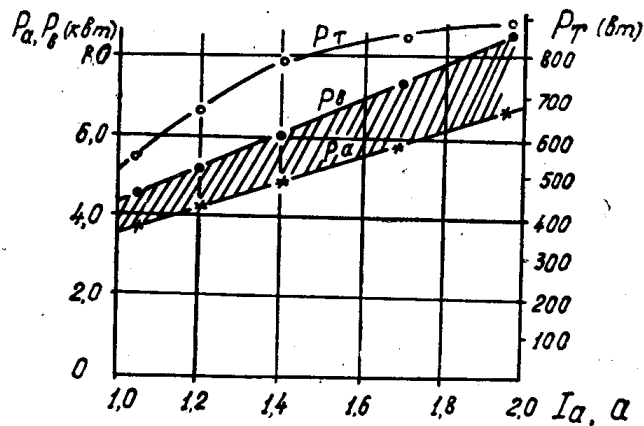


Рис. 2. Распределение мощности в системе в.ч. генератор — разряд.  $P_T$  — тепловая мощность в разряде;  $P_B$  — мощность выпрямителя;  $P_A$  — мощность потерь на аноде лампы.

На рис. 3 представлена вольт-амперная характеристика высокочастотного факельного разряда. По известным формулам были рассчитаны значения коэффициента полезного действия  $\eta$  и  $\cos \varphi$  коэффициента мощности разряда. Результаты представлены в табл. 2 и на рис. 4.

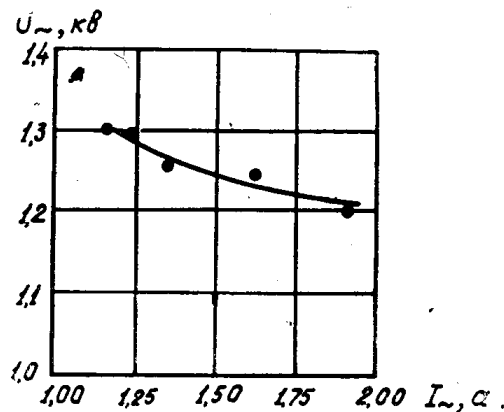


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика высокочастотного факельного разряда

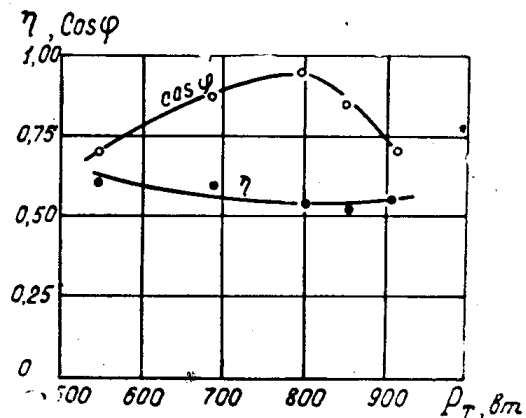


Рис. 4. Зависимость коэффициента мощности разряда и к.п.д. генератора от мощности, выделяемой в разряде.

Представляет интерес расчет активного и реактивного сопротивлений в нагрузке факельного разряда. Известно, что тепловая мощность, выделяемая в разряде, может быть представлена в виде

$$P_T = \frac{1}{2} \cdot I_{\sim}^2 \cdot r_{\phi}, \quad (1)$$

где  $I_{\sim}$  — значение разрядного тока.

Отсюда величина активного сопротивления

$$r_{\phi} = \frac{2P_T}{I_{\sim}^2} \quad (2)$$

и величина реактивного сопротивления

$$X = \frac{1}{\omega C} = r_{\phi} \cdot \operatorname{tg} \varphi = \frac{2P_{\tau} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi}}{I_{\sim}^2 \cdot \cos \varphi} \quad (3)$$

Емкость факельного разряда равна

$$C_{\phi} = \frac{I_{\sim}^2 \cdot \cos \varphi}{2 \cdot \omega \cdot P_{\tau} \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi}} \quad (4)$$

Результаты расчета представлены в табл. 3 и на графике рис. 5. Максимум значения активного сопротивления  $r_{\phi}$  совпадает с миниму-

Таблица 3

№ п. п.	Тепловая мощность разряда $P_{\tau}$	В. ч. ток разряда $I_{\sim}$	$\cos \varphi$	Активное сопротивл. факела $r_{\phi}$	Емкость факела $C_{\phi}$	Примечание
	квт	а		ом	пкф	
1	0,54	1,16	0,71	800	9,2	$\omega = 2\pi \cdot 2,2 \cdot 10^7$
2	0,68	1,22	0,86	1060	11,6	
3	0,8	1,35	0,94	890	22,0	
4	0,85	1,62	0,84	650	17,0	
5	0,91	1,90	0,68	530	14,2	

мом коэффициента полезного действия  $\eta$ : при максимальном значении емкости  $C_{\phi}$  в разряде наблюдается максимум коэффициента мощности разряда. Известно, что сопротивление канала факельного разряда может быть записано

$$r_{\phi} = \frac{l}{\gamma \cdot S}, \quad (5)$$

где  $\gamma$  — удельная проводимость плазмы, усредненная по объему. С другой стороны, если рассматривать канал факельного разряда, как уединенный проводник, то емкость такого проводника запишется

$$C_{\phi} = \varepsilon \cdot l. \quad (6)$$

Если записать обычные выражения для  $\varepsilon$  и  $\gamma$  плазмы [5]:

$$\varepsilon = 1 - \kappa_{\varepsilon} \cdot \frac{\omega_{Le}^2}{(\omega^2 + \nu_{\varepsilon\phi}^2)}, \quad (7)$$

$$\gamma = \kappa_{\gamma} \cdot \frac{\omega_{Le}^2 \cdot \nu_{\varepsilon\phi}}{(\omega^2 + \nu_{\varepsilon\phi}^2) \cdot 4\pi}, \quad (8)$$

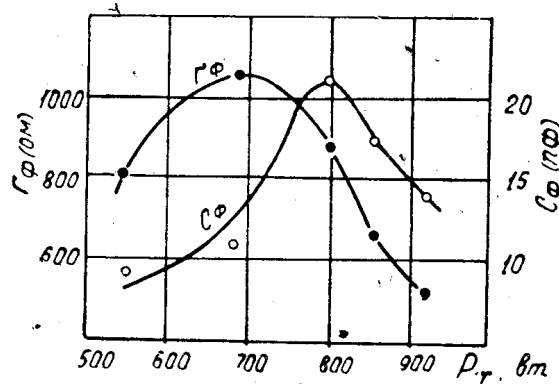


Рис. 5. Зависимость емкости и активного сопротивления разряда от выделяемой мощности.

( $\kappa_\varepsilon$  и  $\kappa_\sigma$  — множители, численные значения которых известны) и подставить их в выражения (5) и (6), то получим:

$$C_\Phi = (\varepsilon - 1) \cdot l = -\kappa_\varepsilon \frac{\omega_{Le}^2 \cdot l}{(\omega^2 + \nu_{\text{эф}}^2)}, \quad (9)$$

$$\frac{1}{r_\Phi} = \gamma \frac{S}{l} = \kappa_\sigma \frac{\omega_{Le}^2 \cdot \nu_{\text{эф}} \cdot S}{(\omega^2 + \nu_{\text{эф}}^2) \cdot 4\pi \cdot l}. \quad (10)$$

Комбинируя выражения (9) и (10), получим

$$C_\Phi \cdot r_\Phi = \frac{\kappa_\varepsilon \cdot 16 \cdot l^2}{\kappa_\sigma \cdot d^2 \cdot \nu_{\text{эф}}}$$

или

$$\nu_{\text{эф}} = 16 \frac{\kappa_\varepsilon \cdot l^2}{\kappa_\sigma \cdot d^2 \cdot C_\Phi \cdot r_\Phi}, \quad (11)$$

Данное выражение дает возможность подсчитать эффективную частоту столкновений электронов с тяжелыми частицами. В нашем случае  $\nu_{\text{эф}}^2 \gg \omega^2$  и, следуя работе [5],  $\kappa_\varepsilon = 1,51$  и  $\kappa_\sigma = 1,13$ . Результаты расчета представлены в табл. 4 и на графике рис. 6.

Таблица 4

№ п. п.	Тепловая мощность разряда $P_T$	В. ч. разрядный ток $I_{\sim}$	Сопротивление факела $r_\Phi$	Емкость факела $C_\Phi$	Длина канала в. ч. факельн. разряда $l$	Частота соударений $\nu_{\text{эф}} \cdot 10^{-13}$	Примечание
	квт	а	ом	пкф	см	сек <sup>-1</sup>	
1	0,54	1,16	800	9,2	12	0,27	$d = 4 \text{ мм}$
2	0,68	1,22	1060	11,6	24	0,62	
3	0,8	1,35	890	22,0	27	0,5	
4	0,85	1,62	650	17,0	29	1,02	
5	0,91	1,90	530	14,2	32	1,82	
1	0,54	1,16	800	9,2	12	0,45	$d = 4 \text{ мм}$
2	0,68	1,22	1060	11,6	24	1,1	
3	0,8	1,35	890	22,0	27	0,89	
4	0,85	1,62	650	17,0	29	1,82	
5	0,91	1,90	530	14,0	32	3,25	

При расчете было принято допущение, что диаметр канала факельного разряда приблизительно остается постоянным.

Точки перегиба, имеющиеся при кривых рис. 6, появляются, по-видимому, вследствие того, что в реальном случае толщина канала факельного разряда не остается постоянной: На участке АВ кривой сравнительно малое возрастание  $\nu_{\text{эф}}$  объясняется тем, что на этом интервале происходит быстрое увеличение объема факела за счет резкого возрастания длины факела: при изменении мощности на 140 вт длина факела увеличивается на 12 см. Для сравнения отметим, что на участке СД при возрастании мощности на 110 вт длина факела увеличивается лишь на 5—6 см. На участке ВС происходит значительное увеличение диаметра факела при малом увеличении длины. На участке СД

рост геометрических размеров факела замедляется, при этом происходит ускоренное повышение температуры в нем. Согласно работе авторов [1], измерения  $r_{\phi}$  и  $C_{\phi}$ , проведенные для факельного разряда малой мощности ( $\sim 70 \text{ вт}$ ), дали значения  $r_{\phi} = 10000 \text{ ом}$  и  $C_{\phi} = 1 \text{ пф}$ . Сравнивая полученные нами значения (например, при помощи  $700 \text{ вт}$   $r_{\phi} = 1060 \text{ ом}$ ,  $C_{\phi} = 11 \text{ пф}$ ), видим, что физические параметры высокочастотного факельного разряда в значительной степени зависят от мощности, подводимой к разряду.

Интересно отметить также, что произведение  $C_{\phi} r_{\phi}$  в обоих случаях имеет равное по порядку величины значение:

$$C_{\phi} r_{\phi} = 10^4 \cdot 10^{-12} \approx 10^3 \cdot 10^{-11} \approx 10^{-8}.$$

Известно, что  $C_{\phi} r_{\phi} = \tau$ , где  $\tau$  — постоянная времени цепи, которая определяет периодичность происходящих в ней процессов.

В нашем случае  $\tau \approx 10^{-8}$  соответствует частоте высокочастотной мощности, питающей разряд. Аналогичные оценки, проведенные для в.ч. факельного разряда, возбуждаемого от промышленных генераторов типа ЛД1-4, ЛД4-10 и ЛД1-40 показывают, что соотношение

$$C_{\phi} r_{\phi} \approx \frac{1}{f}$$

соблюдается с точностью ошибки измерения во всех этих случаях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Кузовников. Научные доклады высшей школы. Физ.-мат. науки, 1958, № 4, 191.
2. Дж. Кристеску, Р. Григоровичи. «Оптика и спектроскопия», 1959, № 6, вып. 2, 129.
3. А. В. Качанов, Е. С. Трехов, Е. П. Фетисов. Сб. «Физика газоразрядной плазмы». 1968, вып. 1.
4. Б. М. Бетин. Радиопередающие устройства. М., «Высшая школа», 1972.
5. В. Л. Гинзбург. Распространение электромагнитных волн в плазме. М., «Наука», 1967.

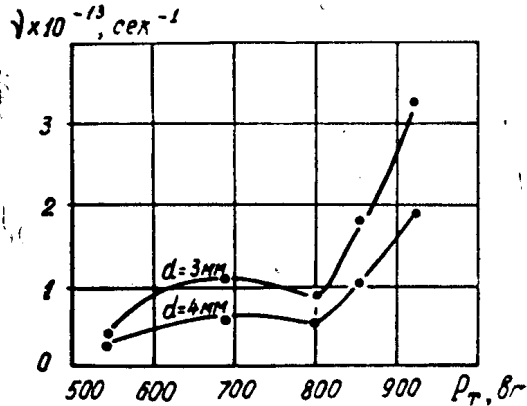


Рис. 6. Зависимость эффективной частоты столкновений от мощности разряда