

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.

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

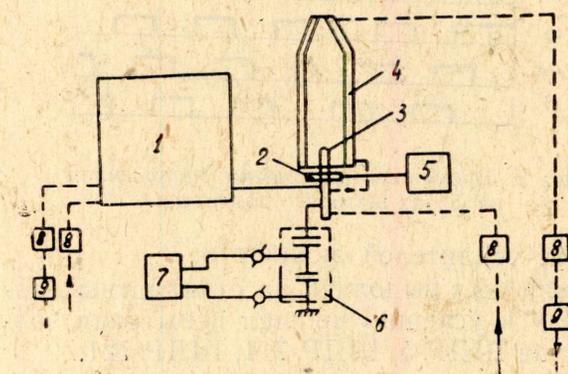


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 — высокочастотный генератор ЛГД-12; 2 — пояс Роговского; 3 — электрод; 4 — плазмотрон; 5 — катодный вольтметр типа «Орион»; 6 — делитель напряжения ДНЕ-6; 7 — катодный вольтметр типа «Орион»; 8 — датчик температуры; 9 — датчик расхода воды.

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 электроде $U_{\sim}$	В. ч. ток разряда $I_{\sim}$	Ток сетки $I_c$	Калориметрирование разряда			Калориметрирование анода		
							$t_0$	$t$	$Q$	$t_0$	$t$	$Q$
							°C	°C	г/сек	°C	°C	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	квв	квв	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.

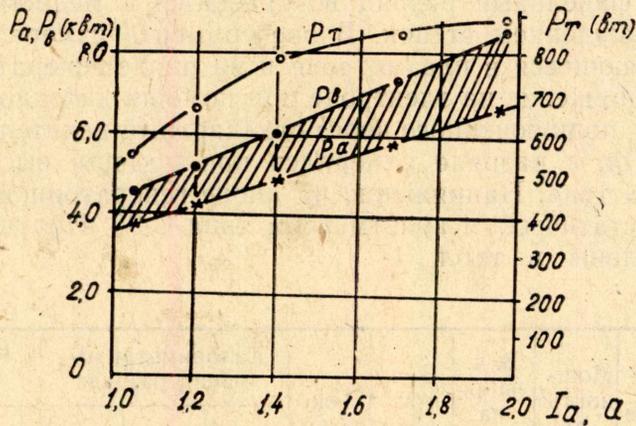


Рис. 2. Распределение мощности в системе в. ч. генератор — разряд.  $P_T$  — тепловая мощность в разряде;  $P_B$  — мощность выпрямителя;  $P_A$  — мощность потерь на аноде лампы.

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.

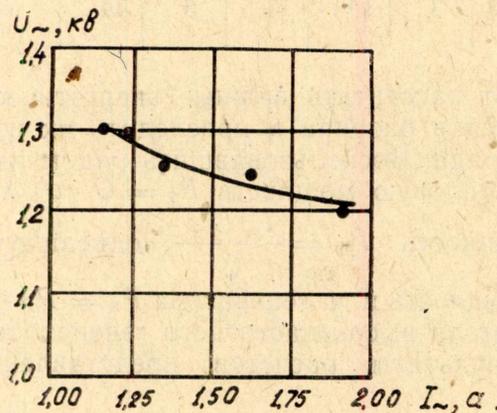


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика высокочастотного факельного разряда

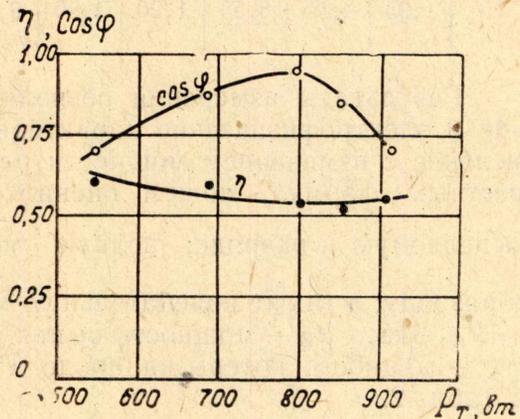


Рис. 4. Зависимость коэффициента мощности разряда и к. п. д. генератора от мощности, выделяемой в разряде.

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

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

Емкость факельного разряда равна

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

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 $P_T$	В. ч. ток разряда $I_{\sim}$	$\cos \varphi$	Активное сопротивление 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]:

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

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

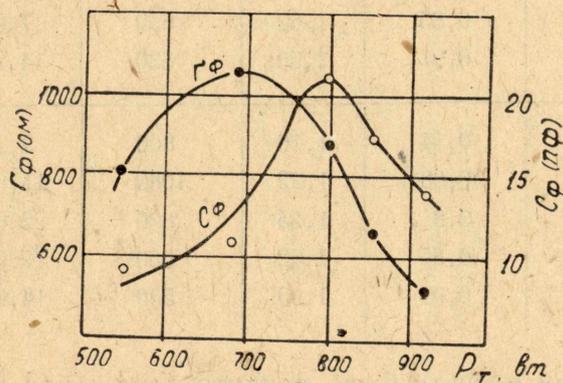


Рис. 5. Зависимость емкости и активного сопротивления разряда от выделяемой мощности.

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

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

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

Комбинируя выражения (9) и (10), получим

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

или

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

Данное выражение дает возможность подсчитать эффективную частоту столкновений электронов с тяжелыми частицами. В нашем случае  $\nu_{эф}^2 \gg \omega^2$  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 $\nu_{эф} \cdot 10^{-13}$	Примечание
	<i>квт</i>	<i>а</i>	<i>ом</i>	<i>пкф</i>	<i>см</i>	<i>сек<sup>-1</sup></i>	
1	0,54	1,16	800	9,2	12	0,27	<i>d = 4 мм</i>
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	<i>d = 4 мм</i>
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, видимо, вследствие того, что в реальном случае толщина канала факельного разряда не остается постоянной: На участке АВ кривой сравнительно малое возрастание  $\nu_{эф}$  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 ( $\sim 70$  вт), дали значения  $r_{\phi} = 10000$  ом и  $C_{\phi} = 1$  пф. Сравнивая полученные нами значения (например, при помощи 700 вт  $r_{\phi} = 1060$  ом,  $C_{\phi} = 11$  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.

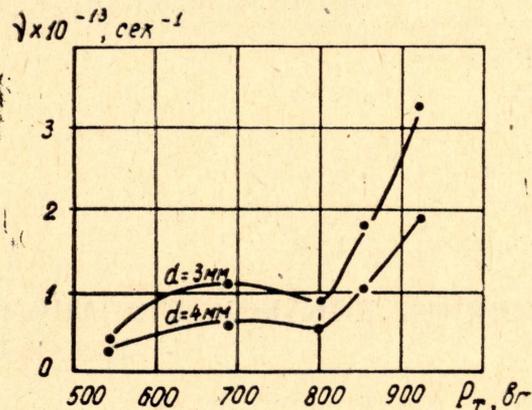


Рис. 6. Зависимость эффективной частоты столкновений от мощности разряда