

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

В. И. ПОПКОВ

**КОЭФФИЦИЕНТ РЕКОМБИНАЦИИ ИОНОВ В УСЛОВИЯХ
КОРОННОГО РАЗРЯДА В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ**

(Представлено академиком А. В. Винтером 21 IX 1947)

Известные данные о коэффициенте рекомбинации ионов в воздухе (¹⁻⁵) измерены в ионизационных камерах при генерировании ионов α - или рентгеновыми лучами. Найденные при этом значения μ для объемной рекомбинации относятся к ионам достаточно значительного возраста, порядка 0,1 сек., поскольку в более короткие времена в ионизационных камерах превалирует так называемая „начальная рекомбинация“, затрудняющая определение μ для объемной. В ряде случаев электрического разряда, например коронного, в воздухе имеет место объемная рекомбинация ионов значительно меньшего возраста, движущихся в поле с высокими градиентами. При этом в случае, например, биполярной короны имеет место движение двух встречных потоков разнополярных ионов, идущих от разноименных по знаку коронирующих электродов. Таким образом, здесь возраст рекомбинирующих ионов оказывается неодинаковым.

В связи с этими отличиями представлялось небезинтересным определить величину μ непосредственно в условиях коронного разряда. Для некоторой области разрядного промежутка двух коронирующих электродов можно вычислить μ на основании данных экспериментального исследования их электрического поля. Как уже указывалось (^{6,7}), для силовой линии, совпадающей с линией симметрии поля, можно написать уравнение (1), справедливое при любом законе изменения k_+ и k_- :

$$\vartheta = (k_+ N_+ + k_- N_-) = \text{const} = C_2, \quad (1)$$

$$\vartheta = \overline{E}_2 / \overline{E}_1, \quad (2)$$

где C_2 — константа вдоль силовой линии; \overline{E}_2 — вектор напряженности поля с объемным зарядом; \overline{E}_1 — вектор лапласова поля; ϑ — скалярная функция координат; k и N — подвижность и плотность ионов.

Если решить известные уравнения рекомбинации совместно с (1), то после ряда преобразований получим:

$$\mu = \frac{k_+ k_- E_2 \frac{d N_+}{d l N_-}}{\frac{N_+}{N_-} (k_+ N_+ + k_- N_-)}, \quad (3)$$

где производная берется по длине силовой линии l . Уравнение (3) относится к области поля от средней эквипотенциальной поверхности

до положительного электрода. Для противоположной части поля в (3) войдет обратное отношение $-N_-/N_+$.

Величины E_2 и произведения kN обоих знаков, входящие в (3), можно измерить непосредственно, если исследовать поле, например, методом характеристик зонда (8). Непосредственное определение подвижностей k_+ и k_- в поле биполярного разряда представляет значительные трудности. Вместе с тем, как уже сообщалось (7), даже во внешней зоне короны, т. е. за пределами зоны ионизации, k_+ и k_- не остаются постоянными. Поэтому для исследования μ с помощью (3) важно выбирать такую область поля, где изменения k_+ и k_- достаточно малы. В этом случае отношение N_+/N_- в (3) можно заменить на k_+N_+/k_-N_- , а произведение k_+k_- полагать постоянным.

Нами использованы результаты экспериментального исследования поля двух параллельных коронирующих проводов $d=1,2$ мм при расстоянии между ними $2H=50$ см. Типичные кривые распределения E_2 и kN уже приводились (6). В табл. 1 и 2 выписан ряд данных, измеренных в области поля в 4—8 см в обе стороны от средней эквипотенциальной поверхности, и по уравнению (3) вычислено значение μ в нескольких точках по длине центральной силовой линии.

Таблица 1
Коэффициент рекомбинации ионов в поле двух коронирующих проводов
(ток короны 34,5 μ A/M)

$-l, \text{ см}$	$E_2 = 0,85 \text{ kV/cm}$					$E_2 = 0,85 \text{ kV/cm}$					$+l, \text{ см}$
	8	6	4	2	0	0	2	4	6	8	
$kN_-/kN_+ \dots$	1,965	1,625	1,425	1,275	1,165	0,857	0,95	1,05	1,135	1,285	kN_+/kN_-
$\Sigma kN \cdot 10^{-7} \dots$	9,05	8,35	8,0	7,85	7,8	7,8	7,7	7,7	7,8	8	$\Sigma kN \cdot 10^{-7}$
$\mu \cdot 10^8 \dots$	1,72	1,74	1,62	1,43	1,26	1,26	1,25	1,27	1,38	1,49	$\mu \cdot 10^8$
Возраст + ионов, t мсек. \dots	24,3	22,7	20,9	19,4	17,6	17,6	16	14,4	12,8	11,3	Возраст + ионов, t мсек.
Возраст - ионов, t мсек. \dots	9,4	10,7	12	13,3	14,7	14,7	15,9	17,2	18,5	19,6	Возраст - ионов, t мсек.

Данные табл. 1 и 2 соответствуют двум опытам при различной силе тока короны. Положение точек поля определяется координатой $\pm l$, отсчитываемой в обе стороны от средней эквипотенциальной поверхности по направлению к коронирующему проводу соответствующего знака. В обеих сериях измерений табл. 1 и 2 ток короны достаточно велик и поэтому E_2 оказывается практически постоянной в значительной части межэлектродного расстояния. Возраст рекомбинирующих ионов, указанный в табл. 1 и 2, равен времени * движения ионов от провода того же знака, что и знак заряда иона, до той точки поля, где вычисляется μ .

* Это время можно определить, используя решение задачи о поле двух проводов, указанное в предшествующей работе (6). В принятых там обозначениях

$$t = \frac{H^2 \ln(2H/a)}{V} \int_{2K\varphi}^{\infty} \frac{1}{k} \frac{S}{\vartheta} d2K\varphi. \text{ При вычислении } t \text{ подвижность была принята постоянной. Поэтому возраст ионов в табл. 1 и 2 несколько преувеличен, в особенности при малых его значениях.}$$

Произведенные нами исследования подвижности ионов в поле короны (7) позволяют заключить, что в диапазоне времен, указанных в табл. 1 и 2, изменение k_- незначительно. Изменение k_+ более заметно, но все же в пределах $l = \pm 8$ см (табл. 1), повидимому, не превзойдет $10^0\%$. Согласно (7), при расчетах по (3) были приняты $k_- = 1,8 \frac{\text{см}}{\text{сек}} / \frac{\text{V}}{\text{см}}$

$$k_+ = 1,2 + 0,7 e^{-\frac{t}{8} \cdot 10^3 \frac{\text{см}}{\text{сек}}} / \frac{\text{V}}{\text{см}}$$

Таблица 2

Коэффициент рекомбинации ионов в поле двух коронирующих проводов
(ток короны 93 $\mu\text{A/M}$)

- l, см	$E_1 = 1,34 \text{ kV/cm}$			$E_2 = 1,35 \text{ kV/cm}$			+ l, см
	4	2	0	0	2	4	
kN_-/kN_+	1,46	1,25	1,045	0,955	1,09	1,29	kN_+/kN_-
$\Sigma kN \cdot 10^{-7}$	13,8	13,5	13,3	13,3	13,4	14	$\Sigma kN \cdot 10^{-7}$
$\mu \cdot 10^3$	2,16	2,05	2,01	2,01	1,82	1,95	$\mu \cdot 10^6$
Возраст + ионов, t м сек.	13,7	12,7	11,6	11,6	10,6	9,6	Возраст + ионов, t мсек.
Возраст - ионов, t м сек.	8,1	8,9	9,7	9,7	10,5	11,3	Возраст - ионов, t мсек.

Численная величина μ , согласно табл. 1 и 2, при всем различии условий оказывается все же близкой к цифрам, измеренным в ионизационных камерах. Максимальное значение около $\mu = 2,16 \cdot 10^{-6}$ согласуется с μ , измеренным в наиболее чистых условиях Сейрсом (4) в воздухе ($\mu = 2,3 - 2,65 \cdot 10^{-6}$) и Гарднером (5) в кислороде ($\mu = 2,08 - 2,5 \cdot 10^{-6}$). Минимальное $\mu = 1,26 \cdot 10^{-6}$ ближе к измерениям Люра и других (1,2) ($\mu = 1,23 \cdot 10^{-6}$), в которых не было вполне исключено влияние влажности воздуха. В обоих случаях отмеченное согласие объясняется, повидимому, противоположным влиянием большей влажности атмосферного воздуха и меньшего в среднем возраста ионов в поле короны в условиях наших опытов.

Данные табл. 1 и 2 обнаруживают вместе с тем определенную зависимость μ от возраста как положительных, так и отрицательных ионов. Именно сокращением возраста ионов одного знака можно объяснить увеличение μ в табл. 1 по мере приближения к каждому из коронирующих проводов, т. е. по мере увеличения координаты l . В каждой из таблиц минимальное значение μ оказывается приблизительно в точках равного возраста ионов обоих знаков. Пространственно эти точки несколько смещены относительно средней плоскости в сторону положительного провода в силу меньшей подвижности положительных ионов.

Численно более высокие μ в табл. 2 по сравнению с табл. 1 объясняются одновременным уменьшением времени t для ионов обоих знаков в силу большего E_2 в опыте табл. 2. Как мы уже указали, изменение k_+ и k_- в пределах времен t , отмеченных в таблицах, невелико. Повидимому, зависимость μ от t гораздо более сильная, чем зависимость $k_+(t)$ или $k_-(t)$. Хотя некоторое различие в этом отношении вытекает уже из сравнения известных теоретических формул для μ и k по Томсону и Ланжевону, все же количественно это явление еще не находит удовлетворительного объяснения. Ана-

логичная неувязка уже отмечалась Брэдбури (3) при попытках объяснить изменения μ в ионизационной камере в опытах Люра и Маршалл.

Энергетический институт
им. Г. М. Кржижановского
Академии Наук СССР

Поступило
21 IX 1947

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ O. Luhr, Phys. Rev., **35**, 1394 (1930); **36**, 24 (1930). ² O. Luhr and N. E. Bradbury, Phys. Rev., **37**, 998 (1931). ³ N. E. Bradbury, Phys. Rev., **37**, 1311 (1931). ⁴ J. Sayers, Proc. Roy. Soc., ser. A, **169**, No. 936, 83 (1938). ⁵ M. E. Gardner, Phys. Rev., **53**, 75 (1938). ⁶ В. И. Попков, ДАН, **58**, № 5 (1947). ⁷ В. И. Попков, ДАН, **58**, № 6 (1947). ⁸ Y. Satoh, Mem. Ryejun Coll. Eng., **5**, No. 314, 205 (1932).