

ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНОЙ ИОНИЗАЦИИ НА ПАРАМЕТРЫ ОЗОНАТОРОВ

Н.А. МАМЕДОВ, Г.М. САДЫХЗАДЕ, ДЖ.Н. ДЖАБАРОВ

*Бакинский Государственный Университет**370048, Баку, ул. З.Халилова 23*

В работе исследуется зависимость концентрации озона на выходе двух конструкций двухбарьерных озонаторов от частоты следования импульсов.

In this paper studied dependence concentration of ozone on the exit of double barrier impulse discharge ozone generators from frequency repetition of impulses.

Бурное развитие озонной технологии, применение различных доз озона в широких отраслях науки, техники и производства требует создания озонаторов с заранее заданными параметрами, где используются некоторые разновидности коронного разряда [1]. С этой точки зрения представляет интерес изучение процессов, протекающих в активной зоне озонаторов, работающих на барьерном разряде.

Рассматривается развитие барьерного коронного разряда переменного тока между двумя коаксиальными цилиндрами, осуществляемого в реальных озонаторах. Основное внимание уделяется роли объемного заряда, образующегося в каждый полупериод подаваемого напряжения во внешней зоне короны и влияющего на начальное напряжение короны, в зависимости от того, успевает ли произойти деионизация разрядного промежутка в каждом полупериоде.

Для возникновения короны, как и любого другого вида электрического разряда в газе, необходимо, чтобы напряжение, приложенное к данной системе электродов, превосходило по величине определенный уровень, называемый начальным напряжением короны. Величина этого напряжения зависит от рода и плотности газа, геометрических размеров и состояния поверхности электродов с малыми радиусами кривизны, на которых собственно и возникает корона. При прочих равных условиях, при изменении межэлектродных расстояний будут изменяться и значения начального напряжения короны. Однако при этом градиенты потенциала электрического поля у поверхности электродов с малыми радиусами кривизны будут сохраняться одинаковыми, что позволяет по их величинам находить и соответствующие начальные напряжения короны для тех или иных систем электродов. Таким образом, начальные градиенты короны являются более общей характеристикой коронирующих электродов, чем начальное напряжение короны.

Начальные градиенты короны определяют условия её возникновения, после чего условия у поверхности электрода изменяются. В первый полупериод, в момент вспышки короны, во внешней зоне ещё отсутствуют объемные заряды, и напряженность поля во всем промежутке распределена, как известно, по гиперболическому закону

$$E(r) = \frac{E_0 r_0}{r}.$$

Такой закон распределения практически сохраняется и во все последующие моменты времени с той только

разницей, что после угасания короны напряженность у поверхности электрода оказывается уже не равной E_0 , а изменяется, сначала уменьшаясь, а затем изменяет свой знак и к моменту новой вспышки короны достигает величины $-E_0$.

В следующий за вспышкой короны момент времени во внешней зоне короны появляется объемный заряд, плотность которого распределена неравномерно, а напряженность электрического поля во всех точках внешней зоны повышается. В следующие моменты времени в течение полупериода фронт волны объемного заряда продвигается дальше вглубь разрядного промежутка.

При величине напряжения, мало отличающейся от амплитудного значения, возникает угасание короны. При этом волна объемного заряда уже полностью сформирована, а её хвост отрывается от поверхности коронирующего электрода и в последующие моменты времени перемещается дальше вглубь промежутка. После угасания короны заряд электрода и напряженность электрического поля у его поверхности начинают уменьшаться. Важной особенностью поля внешней зоны является то, что его напряженность у поверхности электрода и в прилегающей к нему области изменяет знак раньше, чем изменяет знак потенциал электрода при переходе к следующему полупериоду. Это обусловлено наличием во внешней зоне объемного заряда, образованного в процессе коронирования. Такой сдвиг во времени напряженности электрического поля относительно потенциала электрода приводит к более раннему зажиганию короны во второй полупериод, чем в первый и, соответственно, к снижению напряжения вспышки короны во второй полупериод по сравнению с первым, которое соответствует начальному напряжению короны.

При новой вспышке короны в следующий полупериод, хвост волны объемного заряда, созданного в предшествующий полупериод, находится на некотором удалении от поверхности электрода, хотя и движется уже к нему под действием напряженности поля измененной полярности. Это означает, что вспышка имеет место в чистом от объемного заряда пространстве и независимо от полярности, будет происходить при достижении электрического поля, у электрода начальной величины, а не критической, характерной для развитой короны.

В следующий после новой вспышки момент времени, когда фронт нового объемного заряда продвигается от поверхности электрода на значительное расстояние, хвост волны заряда предшествующего полупериода ещё

ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНОЙ ИОНИЗАЦИИ НА ПАРАМЕТРЫ ОЗОНАТОРОВ

не достиг поверхности электрода. Волны объёмных зарядов противоположного знака в некоторый момент времени вступают в соприкосновение и частично перекрывают друг друга. Это сопровождается возникновением процесса рекомбинации, которая во все последующие моменты времени уже не прекращается и является одной из главных причин уменьшения объёмных зарядов того и другого знаков, заполняющих внешнюю зону короны.

Когда хвост волны объёмного заряда достигает поверхности электрода, начинается возврат ионов, образованных в предшествующий полупериод, на электрод и их нейтрализация на нём. Таким образом, возникает ионный ток возврата и вступает в действие ещё одна причина уменьшения объёмного заряда внешней зоны короны. Процесс рекомбинации и ток возврата являются основными особенностями биполярного режима короны переменного тока, отличающими этот режим от униполярного.

Другое отличие короны переменного тока от униполярной короны заключается в следующем. В случае униполярной короны начальные градиенты короны, определяющие условия её возникновения и критические градиенты, т.е. градиенты потенциала электрического поля у поверхности коронирующего электрода в условиях развитой короны, практически равны [2, стр.57]. Иначе обстоит дело в случае короны переменного тока, когда во внешней зоне короны существуют ионы обоих знаков. Появляется возможность снижения критического градиента в положительный полупериод переменного напряжения за счет разрушения отрицательных ионов, поступающих из внешнего пространства в зону ионизации и служащих дополнительным источником свободных электронов.

Об этом факте свидетельствует экспериментальная характеристика зажигания короны переменного тока [2, стр.80]. Характеристика зажигания короны переменного тока - зависимость мгновенных значений напряжения, при которых происходит вспышка короны в каждый полупериод, от амплитуды напряжения. Отличительной особенностью характеристики зажигания является её падающий характер по мере увеличения амплитуды напряжения мгновенные значения напряжения зажигания уменьшаются. Это связано с действием объёмного заряда предыдущего полупериода, остающегося во внешней зоне и усиливающего градиент у поверхности коронирующего электрода в последующий полупериод после изменения полярности напряжения. Благодаря этому создаются условия, необходимые для вспышки короны, при напряжении источника, меньше, чем начальное напряжение короны.

Аналогичного эффекта можно ожидать не только при изменении амплитуды, но и частоты подаваемого напряжения. В самом деле, с увеличением частоты и, следовательно, уменьшением длительности каждого полупериода, уменьшается время, необходимое для деионизации разрядного промежутка и, по-видимому, должна расти величина объёмного заряда, остающегося после предыдущего полупериода.

Оценим время, за которое происходит деионизация с учетом того, что причиной убыли заряда во внешней зоне короны, кроме рекомбинации ионов, как уже отмечалось

выше, является частичный возврат ионов к внутреннему электроду. Однако вышеуказанные причины убыли объёмного заряда из внешней зоны не равнозначны по количественным результатам. Соотношение амплитуд зарядов и продолжительностей возврата и рекомбинации ионов [3] показывает, что убыль объёмного заряда во внешней зоне короны определяется рекомбинацией в значительно большей степени, чем возвратом ионов на центральный электрод.

Поэтому, по-видимому, для расчета убыли объёмного заряда можно воспользоваться формулой для среднего "рекомбинационного" времени жизни иона [4] τ при концентрации N :

$$\tau = \frac{1}{\rho N}$$

где ρ - коэффициент рекомбинации, значения которого для воздуха при различных давлениях приводятся в [5].

Для расчета плотности объёмного заряда N следует учесть, что вспышки короны в каждый полупериод происходят в чистом от объёмного заряда, оставшегося от предыдущих полупериодов, пространстве, вблизи поверхности электрода. Другими словами, это происходит при напряженности электрического поля у поверхности электрода, равной начальной напряженности, соответствующей полярности данного полупериода. Ионы предыдущего полупериода начинают поступать на электрод спустя некоторое время после вспышки и только тогда могут влиять на элементарные ионизационные процессы и на величину критического градиента.

Исходя из этого, можно предположить, что для расчета величины плотности заряда N применима формула для плотности пространственного заряда при пробое самоподдерживающейся униполярной короны в случае цилиндрической геометрии [5]:

$$N = \frac{iP \lg\left(\frac{R}{r}\right)}{2\pi U_0 \mu_0 e}$$

Здесь i - полный ток на единицу длины цилиндра на расстоянии r : $i = 2\pi r e v$, где $v_{op} = \mu E_0 = \frac{\mu_0 E_0}{P}$,

где μ - подвижность, E_0 - напряженность электрического поля, R и r - радиусы внешнего и внутреннего цилиндров, соответственно, U_0 - потенциал между электродами, e - заряд электрона, P - давление газа.

Расчеты проведены для двух озонаторов, в которых используется коронный разряд между двумя коаксиальными цилиндрами в воздухе и кислороде при давлениях от 1 до 1,6 атм, которые являются рабочим диапазоном действующих озонаторов.

Особенностью конструкции озонаторов являлось то, что разряд происходил между двумя коаксиальными диэлектрическими барьерами (диэлектрическая проницаемость $\epsilon=4$), внутренний электрод озонатора помещался внутри барьера с малым радиусом кривизны, внешний же электрод был расположен поверх второго. Это создавало дополнительную ёмкость, которую приходилось учитывать при расчете напряженности электрического поля [6]:

$$E = \frac{U_0}{r \ln \frac{R}{r}} \cdot \frac{C_D}{C_D + C_{II}}$$

Здесь C_D - ёмкость диэлектрического барьера, C_{II} - ёмкость разрядного промежутка, рассчитанные по методике, приведенной в [2].

Параметры первого озонатора: число активных элементов $n=163$, внутренние и внешние радиусы внутреннего и внешнего стеклянных барьеров $r_{вн}=2$ мм,

$R_{вн}=6$ мм и $r_{вн}=4$ мм, $R_{вн}=7,5$ мм.

Отметим, что внутренний радиус внешнего электрода R озонатора совпадает с внешним радиусом $R_{вн}$ второго, а внешний радиус внутреннего электрода r совпадает с внутренним радиусом первого диэлектрического барьера $r_{вн}$.

Ширина разрядного промежутка $d_n=2$ мм, длина активной части $l=630$ мм, рабочее напряжение $U_0=7$ кВ, разрядный ток на один элемент $I=10$ мА.

Р атм		1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	
$\rho \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}$	О ₃	2,25	2,27	2,28	2,28	2,29	2,3	2,3	
	Воздух	2,4	2,43	2,44	2,44	2,45	2,46	2,46	
$\mu_0 \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	I озонатор	О ₃	1,493	1,4925	1,467	1,412	1,329	1,216	1,087
		Воздух	2,09	20,09	2,05	1,98	1,86	1,7	1,52
	II озонатор	О ₃	1,491	1,502	1,413	1,492	1,522	1,488	1,485
		Воздух	2,087	2,103	1,978	2,089	2,131	2,083	2,08
$N \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$	I озонатор	О ₃	6,229	6,231	6,34	6,586	6,998	7,648	8,556
		Воздух	4,4498	4,4508	4,5366	4,697	5	5,4706	6,1184
	II озонатор	О ₃	5,0302	4,9933	5,3079	5,0268	4,9277	5,0403	5,0505
		Воздух	3,5937	3,5663	3,7917	3,5902	3,5195	3,6006	3,6058
$\tau \cdot 10^{-3} \text{ с}$	I озонатор	О ₃	0,107	0,107	0,1052	0,1013	0,0953	0,0872	0,0779
		Воздух	0,1605	0,1605	0,1575	0,1521	0,1429	0,1306	0,1167
$\tau \cdot 10^{-3} \text{ с}$	II озонатор	О ₃	0,1325	0,1325	0,1256	0,1326	0,1353	0,1323	0,123
		Воздух	0,1981	0,1984	0,203	0,199	0,1884	0,2003	0,1988

Параметры второго озонатора: $n=12$, $r_{вн}=r=3$ мм, $R_{вн}=6,5$ мм и $r_{вн}=4,5$ мм, $R_{вн}=R=7,5$ мм; $d_n=2$ мм, $l=280$ мм, $U_0=10$ кВ, $I=7$ мА.

Проведенные расчеты сведены в таблицу, из которой видно, что в исследуемом рабочем диапазоне давлений озонаторов время жизни τ почти не меняется с изменением P , а, следовательно, в указанном диапазоне, невозможно управлять объемным зарядом в озонаторе с помощью давления.

С другой стороны из той же таблицы видно, что время жизни остаточных ионов (время деионизации) существенно различается у разных типов озонаторов и следовательно, успевает ли плазма деионизироваться между двумя вспышками короны, происходящими каждый полупериод, зависит, как показывают расчеты, от параметров озонаторов. Судя по всему, с увеличением частоты

подаваемого напряжения, время между двумя полупериодами уменьшается, и плазма не успевает деионизоваться, что приводит к увеличению объемного заряда и, следовательно, под его воздействием, уменьшению напряжения зажигания короны, аналогично тому, как это происходило, как указано выше, при увеличении амплитуды подаваемого напряжения.

Учитывая вышеизложенное, по-видимому, варьируя не только амплитуду, но и частоту подаваемого напряжения, можно найти оптимальные условия для зажигания короны переменного тока, а следовательно осуществить наиболее энергетически выгодную модель озонатора.

Расчеты для случая озонаторов с периодическими неоднородностями поверхности внутренних электродов [7] несколько усложняются.

[1]. В.В. Лунин, М.П. Попович, С.Н. Ткаченко. Физическая химия озона. Изд. МГУ. 1998, стр.61(478).
 [2]. Ч.М. Джуварлы, Ю.В. Горин, Р.Н.Мехтизаде. Коронный разряд в электроотрицательных газах. Изд. "Элм", Баку. 1988, стр.41(144).
 [3]. В.И. Левитов "Корона переменного тока" Энергия, М. 1969. 280с.
 [4]. А.Энгель - "Ионизованные газы" ГИФМЛ, М., 1959.стр.162(332).
 [5]. С.Браун - "Элементарные процессы в плазме газовой

го разряда", Госатомиздат, М., 1961.стр.266 (322).
 [6]. Н.А.Мамедов, Дж.Н. Джабаров Некоторые электростатические характеристики озонных генераторов. Вестник БГУ, №2, 1999. стр.91-96.
 [7]. Н.А.Мамедов, Г.И.Гарибов, Г.М.Садых-заде, Ш.Ш. Алекберов Влияние периодических неоднородностей на производительность озонаторов. Вакı Universitetinin xəbərləri, fiz-riy. elm. seriyası, №2, 2006, стр.152-157.