

Ш. А. БАХТАЕВ, А. Ж. ТОЙГОЖИНОВА, Г. К. СЫДЫКОВА

(Алматинский университет энергетики и связи, г. Алматы)
(Кызылординский государственный университет им. Коркыт-Ата, г. Кызылорда)

О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ПЛОТНОСТИ ОЗОНА В РАЗРЯДНОЙ ЗОНЕ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ КОРОНЫ

THE DENSITY DISTRIBUTION IN THE DISCHARGE ZONE OZONE NEGATIVE CORONA

Abstract: To determine the parameters of electron avalanches typically use an electrical method, by measuring the characteristics of the current pulses to the electrodes of the discharge (impulses Trichelya) that allows you to split e (edge) and ionic (pulse) components of electron avalanches. The solution to this problem with the help of the continuity equations for charged particles, is currently not possible, as there are no initial conditions for the ions present in the equations and also the density of neutral atoms and molecules of oxygen and ozone. Thus, it remains virtually the only way to determine the amount of ozone – this experimental measurement of ozone concentrations in the air or in the gas blown through the discharge gap. Therefore is more appropriate way to determine the ion density in the discharge gap, including ozone and ions, in terms of the discharge current, which can be measured and determined by the current-voltage characteristics of the discharge

A qualitative picture of the distribution of ions O , O_2 , O_3^- , O_2^+ and electrons in the corona layer of negative corona. Based on the calculated current-voltage characteristics of the obtained values of the densities of oxygen ions to ozone and corona at the boundary layer. Use the continuity equation for ions ozone obtained an expression for the density of neutral molecules of ozone in the discharge zone of negative corona.

Keywords: unipolar corona, ozone density, Trichel pulses, electrons, ions.

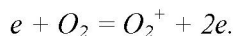
Аннотация. Дана качественная интерпретация электрохимических процессов при образовании и разложении озона в разрядной зоне отрицательной короны. Выполнено сравнение расчетных значений плотности озона в разрядной зоне с результатами измерения внешних электрических характеристик разряда (вольтамперные характеристики, импульсы Тричеля, разделение электронной и ионной составляющих импульса).

Ключевые слова: униполярная корона, озон, плотность, импульсы Тричеля, электроны, ионы.

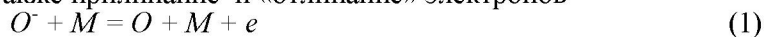
Кілт сөздер: бірполюстік тәжді разряд, озон, тығыздық, Тричельдің импульстары, электрондар, иондар.

Основные реакции при электросинтезе озона [1], в основном, определяют скорости процессов образования и разложения озона. Одновременно с ними существуют в чехле короны значительное число ионно-молекулярных реакций, однако вклад последних непосредственно в эти процессы, как следует из результатов исследований незначителен [2].

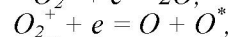
Наиболее существенным фактором в процессах синтеза озона является реакция ионизации прямым электронным ударом



Наряду с этой реакцией, которая является основной реакцией «размножения» электронов в чехле короны, необходимо учитывать также прилипание и «отлипание» электронов

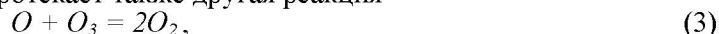


Кроме того, существует чрезвычайно быстрая реакция

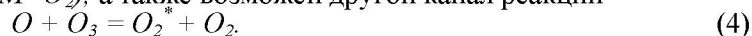


с константой скорости реакций порядка $10^{-7} \text{ см}^3/\text{с}$ и которая, с одной стороны, влияет на динамику электронных процессов, а с другой – тесно связана с процессами образования озона.

Наряду с реакцией разложения озона протекает также другая реакция



где в качестве третьего тела служит O_2 ($M=O_2$), а также возможен другой канал реакций



В связи с возможностью появления колебательно-возбужденных молекул O_3 , необходимо допустить, что имеют место реакции



Реакция O^* с озоном является одной из самых быстрых атомно-молекулярных реакций

Поэтому трудно отдать предпочтение какой-либо реакции, т.к. они протекают почти одновременно и на порядок рассмотрения их не влияют ни нумерация ансамблей реакций, ни расстановка ветвей в ансамблях. Тем более из-за насыщенности диаграммы не было возможности указать электронные состояния атомов и молекул кислорода и к тому же не приведены их константы скорости реакций, что не позволило более подробно рассмотреть их роли в образовании и потере озона в разрядном промежутке.

За первые 2 ансамбля реакций (1, 2) ответственны ионы O_2^+ , которые создаются ионизацией O_2 электронным ударом, причем предполагается, что реагирующие с ними ионы, атомы и молекулы газа уже имеются в разрядном промежутке.

Ансамбли 3 и 4 образуются реакциями O_2 с остальными нейтральными и заряженными частицами газа, преимущественно с кислородом; имеет место перезарядка O_2 и O^- .

Ансамбли 5 и 6 являются вторичными, которые образуются с помощью O_2^- и O_2 при участии их в реакциях с остальными атомами и молекулами кислорода.

При нехватке энергии электрона для ионизации происходит диссоциация O_2 на O^- и O , что создает ансамбли 7 и 8. Образованные в ансамблях 4 и 5 ионы O_4^- (3-ветвь) здесь вносят также свой вклад в получение ионов озона (8-ансамбль, 3-ветвь).

Таким образом, время, которое проходит электрон расстояния $0,3\sqrt{r_0}$ будет «временем жизни» электрона, а за границей чехла короны уже отсутствуют процессы ионизации и основная часть электронов исчезает из-за прилипания к атомам и молекулам кислорода и озона. Расчеты показывают, что время прохождения электрона толщины коронирующего слоя не превышает $100нс$ для МП с диаметром 50 микрон. За это время в электронной лавине появляются атомы кислорода и другие возбужденные частицы и практически заканчиваются ионно-молекулярные реакции. Затем протекают реакции возбужденных частиц и атомно-молекулярные реакции и ко времени 5-10мкс в лавине остаются лишь молекулы озона и возбужденные молекулы кислорода. По истечении времени порядка 0,1 - 1мс происходит выравнивание концентрации озона во всем разрядном промежутке за счет диффузионных процессов или из-за уноса озона потоком воздуха.

Детальное обсуждение физико-химических процессов в чехле короны и представленное описание электрохимических реакций, причастных непосредственно или косвенно к электро-синтезу озона не решают вопросы распределения плотности озона в разрядном промежутке. В связи с этим нам придется довольствоваться расчетными данными работы [1], что может позволить построить качественную картину распределения плотности озона и других носителей заряда в коронирующем слое. При этом используется упрощенная схема разрядного промежутка, когда процессы образования и исчезновения озона и других заряженных частиц происходят только в чехле короны, а за границей чехла до внешнего электрода протекает униполярный поток ионов. Естественно предполагать, что плотности ионов озона и других носителей заряда на границе чехла короны будут максимальными, а затем при движении к внешнему электроду плотности их будут уменьшаться, что связано геометрией разрядного промежутка (например, цилиндрическая система электродов). На рисунке 2 представлена качественная картина кривых распределения плотности (n) ионов озона и других носителей тока в относительных единицах.

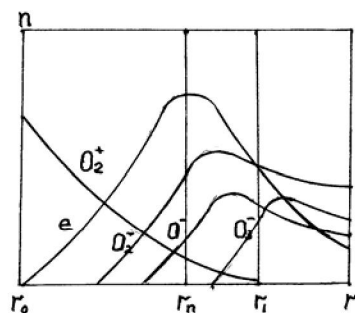


Рисунок 2 – Распределение плотности ионов озона (n) в чехле короны

Основанием для построения зависимостей распределения плотности ионов озона и других заряженных частиц от расстояния до коронирующей проволоки послужили следующие обстоятельства:

1. Данные качественной интерпретации при рассмотрении структуры чехла короны.
2. Расчетные данные кинетических уравнений, описывающих элементарные процессы в чехле короны.
3. Диаграмма электрохимических реакций в чехле короны, причастных к синтезу озона (рисунок 1).

Эти обстоятельства существенно дополняются в пространственно-временном плане рассмотрением одиночной электронной лавины, характерной для отрицательной короны на МП. Ионизационный процесс, начатый одним или несколькими электронами на поверхности проволоки, бурно развивается дальше, распространяясь до границы коронирующего слоя,

находящегося на расстоянии $0,3\sqrt{r_0}$. По современным данным электронная лавина представляет собой почти симметрично-сферическое расширяющееся облако, за которым тянется след ионизированных и возбужденных атомов и молекул, симметричный относительно направления внешнего электрического поля [3].

Для определения параметров электронных лавин обычно используют электрический метод, измеряя характеристики импульсов тока на электродах разряда (импульсы Тричеля), что позволяет разделить электронную (фронт импульса) и ионную (длительность импульса) составляющие электронных лавин. Здесь также затруднительно судить об объёме вклада ионов озона в суммарный разрядный ток и определить количество производимого в разряде озона [4].

Решение данной задачи с помощью системы уравнений непрерывности для заряженных частиц, в данный момент не представляется возможным, так как отсутствуют начальные условия для ионов и в уравнениях присутствуют также плотности нейтральных атомов и молекул кислорода и озона. Кроме того, составление балансов ионов по электрохимическим реакциям приводит к еще более громоздкому материалу и, в конечном итоге, к неопределенности решения задачи.

Таким образом, остаётся практически единственный путь определения количества озона, – это экспериментальное измерение концентраций озона в воздухе или в газе, продуваемого через разрядный промежуток.

Поэтому более приемлемым является путь определения плотности ионов в разрядном промежутке, в том числе и ионов озона, через величину разрядного тока, которая может быть измерена и определена по вольтамперным характеристикам разряда. Для цилиндрической системы электродов величина тока униполярной короны определяется по известной формуле [5]

$$I = 2\pi r n e k E, \quad (9)$$

где r – расстояние от оси цилиндрической системы электродов, см; n – плотность ионов, см⁻³; k – подвижность ионов, см²/Вс; E – напряженность поля во внешней области короны, В/см; e – заряд электрона, $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Для корректности решения задачи сделаем ряд допущений:

1. Во внешней зоне короны отсутствуют процессы и реакции, которые меняли бы сортность или плотность ионов, причем по радиусу цилиндра соблюдается соотношение $n_1 r_1 = n_2 r_2$.

2. Во внешней зоне короны подвижности ионов O , O_2^- , O_3^- приняты постоянными и равными соответственно $k_1 = 3,2$, $k_2 = 2,24$ и $k_3 = 2,54$ см²/Вс.

3. При допущении постоянства подвижности ионов напряженность электрического поля во внешней зоне униполярной короны приближенно описывается уравнением [6]

$$E = \sqrt{I / 2\pi \epsilon_0 k + E_0^2 r_0^2 / r^2}, \quad (10)$$

где E_0 – начальная напряженность поля короны, которая определяется по формуле Пика [7], В/см; r_0 – радиус коронирующей МП, см; ϵ_0 – диэлектрическая постоянная, Ф/см.

В связи с тем, что второй член под корнем $E_0^2 r_0^2 / r$ является малой величиной по сравнению с первым членом, E во внешней области имеет постоянное значение и зависит только от I .

Теперь, введя для удобства обозначения плотности ионов O , O_2^- и O_3^- в виде n_1 , n_2 и n_3 соответственно, запишем уравнение (10) следующим образом

$$I = 2\pi r e E (k_1 n_1 + k_2 n_2 + k_3 n_3), \quad (11)$$

и если воспользоваться соотношениями для расчетов, то получим $n_1 = \frac{n_3}{1,28}$ и $n_2 = 1,32 n_3$. После подстановки их в уравнение (11) и некоторых операций определяем выражение для плотности ионов озона

$$n_3 = \frac{I}{2\pi r_1 e E \left(\frac{k_1}{1,28} + 1,32 k_2 + k_3 \right)}, \quad (12)$$

где r_1 – радиус границы коронирующего слоя, равный $0,3\sqrt{r_0}$ см.

Расчеты по этой формуле для озонирующей ячейки со следующими параметрами $r_0 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ см}$, $r_i = 0,3 \sqrt{r_0 \text{ см}}$, $I = 0,166 \cdot 10^{-3} \text{ А/см}$, $E = 12 \text{ кВ/см}$ дают

$$n_3 = 8,19 \cdot 10^{10} \text{ см}^3; \quad n_2 = 10,8 \cdot 10^{10} \text{ см}^3; \quad n_1 = 6,4 \cdot 10^{10} \text{ см}^3.$$

Ввиду того, что эти значения соответствуют плотности ионов O , O_2^- и O_3^- на границе коронирующего слоя, для наглядности построены кривые распределения плотности ионов n_1 , n_2 и n_3 во внешней зоне разряда (рисунок 3).

В расчетах не была принята во внимание электронная составляющая разрядного тока, хотя она ощутима вблизи чехла короны. Так как воздух является электроотрицательным газом, состоящим из атомов и молекул кислорода и озона, имеющих высокое электронное сродство ($O - 1,46$, $O_2 - 1,8$, $O_3 - 1,96 \text{ эВ}$) во внешней области разряда отсутствует электронный поток как таковой, хотя он постоянно участвует в процессах «прилипания» и «отлипания» вплоть до внешнего электрода [8].

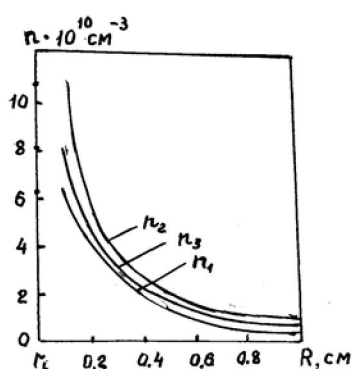


Рисунок 3 – Распределение плотности ионов O , O_2^- и O_3^-

Оценочные расчеты и данные некоторых авторов [9] показали, что озон из-за своего высокого электронного сродства в разряде существует в основном в виде отрицательных ионов, которые дойдя до внешнего электрода, становятся нейтральными и уходят из зоны разряда. В этом случае для повышения производительности и эффективности работы озонирующей ячейки необходима продувка воздухом разрядного промежутка [10,11].

Оценочные расчеты и данные некоторых авторов [9] показали, что озон из-за своего высокого электронного сродства в разряде существует в основном в виде отрицательных ионов, которые дойдя до внешнего электрода, становятся нейтральными и уходят из зоны разряда. В этом случае для повышения производительности и эффективности работы озонирующей ячейки необходима продувка воздухом разрядного промежутка [10,11].

Введя новые обозначения $[n_1]$, $[n_2]$ и $[n_3]$ для атомов и молекул кислорода и озона (O , O_2 и O_3), определим плотность нейтральных молекул озона. В этом случае уравнение непрерывности для ионов озона выглядит следующим образом

$$K_3 E \frac{dn_3}{dr} = (n_1 [n_3] + n_2 [n_3]) K_{13} - (n_3 [n_2] + n_3 [n_1]) K_{23}, \quad (13)$$

которое является дифференциальным уравнением первого порядка и его решение будет

$$n_3 = \frac{([n_2] + [n_1]) K_{23}}{(n_1 [n_3] + n_2 [n_3]) K_{13}} - \frac{([n_2] + [n_1])(r - r_0)}{K_3 E} + n_{30} e, \quad (14)$$

где n_{30} – начальная концентрация ионов озона при $r = r_0$, которая близка к нулю и для n_3 определяющим является первый член формулы, где присутствуют O , O_2 , O_1^- , O_2^- и O_3 .

Учитывая это из формулы найдем выражение для плотности нейтральных молекул озона

$$[n_3] = \frac{([n_2] + [n_1]) K_{23}}{n_3 (n_1 + n_2) K_{13}}, \quad (15)$$

где K_{13} и K_{23} – константы скорости реакции образования и потери ионов озона, которые имеют один порядок и равны $\approx 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$.

Поэтому без особой погрешности их можно сократить. После подстановки в формулу (15) значения n_1 , n_2 и n_3 , а также значения $[n_1]$ и $[n_2]$ для нормальных атмосферных условий (число Лoshмидта) была получена величина плотности $[n_3]$ на границе чехла короны, которая оказалась малой величиной, что подтверждает наши предположения об отсутствии нейтральных молекул озона в разрядном промежутке.

Выводы: Дана качественная картина распределения ионов O^+ , O_2^+ , O_3^+ , O_2^- и электронов в коронирующем слое отрицательной короны. На основе вольтамперных характеристик получены расчетные значения плотностей ионов озона и кислорода на границе коронирующего слоя. Воспользуясь уравнением непрерывности для ионов озона получено выражение для плотности нейтральных молекул озона в разрядной зоне отрицательной короны.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Бахтаев Ш. А., Боканова А.А., Бочкарева Г.В., Сыдыкова Г.К. Физика и техника коронноразрядных приборов. – Алматы, 2007 г. – 279 с.
- 2 Филиппов Ю.В., Вобликова В.А., Пантелеев В.И. Электросинтез озона. – М., МГУ, 1987, 237 с.
- 3 Лозанский Э.Д., Фирсов О.Б. Теория искры. М., Атомиздат, 1975, 271 с.
- 4 Бахтаев Ш.А., Бокова Г.И., Петров В.С. О развитии электронной лавины в атмосферном воздухе // Радиационные и диффузионные явления. Межвуз. сб. АГУ, Алматы, 1992, С.25-29.
- 5 Капцов И.А. Коронный разряд и его применение в электрофильтрах. М.Л., Гостехиздат, 1947, 226 с.
- 6 Бахтаев Ш.А. Коронный разряд на микропроводах. Алма-Ата, Наука, 1984, 208 с.
- 7 Пик Ф. Диэлектрические явления в технике высоких напряжений. Пер.с англ. М.Л., Госэнергоиздат, 1934, 362 с.
- 8 Джуварлы Ч.М., Горин Ю.В., Мехтизаде Р.Н. Коронный разряд в электроотрицательных газах. Баку, ЭЛМ, 1988, 144 с.
- 9 Gernak M., Skalny S., Veis S. // Asta. Phys. Slov., 1979, V.29, N 1. P.31-38.
- 10 Бахтаев Ш.А., Алмагамбетов Б.Н., Бокова Г.И. Электросинтез озона в коронном разряде // Волновые процессы, Межвуз. сб. АГУ, Алматы, 1994. С.73-77.
- 11 Бахтаев Ш.А., Бокова Г.И. Кинетика образования в коронном разряде. Информ.листок /КазгосИНТИ, 1996, № 108, 2 с.

REFERENCES

- 1 Bahtaev S. A., Bokanova A.A., Bochkareva GV, Sadykova G.K. Physics and technology koronnorazryadnyh devices. – Almaty, 2007y. – 279 p.
- 2 Filippov Y.V., Voblikova V.A, Panteleev V.I. Electrosynthesis of ozone. – Moscow, Moscow State University, 1987, 237 p.
- 3 Lausanne E.D., Firsov O.B. Spark Theory. – M., Atomizdat, 1975, 271 p.
- 4 Bahtaev S.A., Bokova G.I., Petrov V.S. On the development of an electron avalanche in the air // Radiation and diffusion phenomena. Intercollege. Sat ASU, Almaty, 1992. P.25-29.
- 5 Kaptsov I.A. Corona discharge and its application in electrostatic. M.L., Moscow 1947, 226 p.
- 6 Bahtaev S.A. Corona discharge on microwire. Alma-Ata, Nauka, 1984, 208 p.
- 7 Peak F. Dielectric phenomena in high voltage engineering. Per.s Eng. M.L. Gosenergoizdat, 1934, 362 p.
- 8 Juvarly Ch.M., Gorin Y. V., Mekhtizade R.N. Corona discharge in electronegative gases. Baku, ELM, 1988, 144 p.
- 9 Gernak M., Skalny S., Veis S. // Asta. Phys. Slov., 1979, V.29, N 1. P.31-38.
- 10 Bahtaev S.A., Almagambetov B.N., Bokova G.I. Electrosynthesis of ozone in the corona // Wave processes, Mezhvuz. sb. ASU, Almaty, 1994. P.73-77.
- 11 Bahtaev S.A., Bokova G.I. Kinetics of formation of the corona. Inform.listok / KazgosINTI, 1996, № 108, 2 p.

Резюме

СОЛПОЛЮСТІК ТӘЖДІ РАЗРЯДТАЛУ АЙМАҒЫНДА ОЗОННЫҢ ТАРАЛУ ТЫҒЫЗДЫҒЫ ТУРАЛЫ

Солполюстік тәждің тәжділеуші қабатында O^+ , O_2^+ , O_3^+ , O_2^- иондар мен электрондардың таралуының сапалы суреттемесі берілген. Вольтамперлік сипаттама негізінде тәжділеуші қабат шекпелінде озон және кислород иондары тығыздығының есептелген мәні алынды.