

УДК 537.523/.527 (575.2) (04)

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНТЕЗА ОЗОНА В КОРОННЫХ РАЗРЯДАХ

А.В. Токарев – канд. физ.-мат. наук, доцент

Results of experimental researches of air ozone synthesis characteristics and oxygen in corona discharge are considered. Positive, negative and pulse corona discharge were lit in a discharge contour of coaxial geometry under identical conditions.

Введение. В настоящее время интерес к генерации озона возрастает в связи с широким его использованием в различных технологических процессах: обеззараживание воды, очистка газов от токсичных примесей, химический синтез, отбеливание целлюлозы [1–4]. Поэтому актуальным является поиск новых технологий синтеза озона, отличающихся малыми энергозатратами на получение продукта и простотой реализации технологического процесса. В этом отношении наряду с традиционно используемыми поверхностными разрядами представляют интерес генераторы озона на основе коронных разрядов [5]. В литературе имеются противоречивые данные по синтезу озона в различных коронных разрядах (положительный, отрицательный и импульсный) [6–8]. Поэтому выбор оптимального метода производства озона на базе озонаторов с коронным разрядом остается открытым.

В связи с этим целью работы являлось исследование характеристик синтеза озона (концентрация и удельные энергозатраты) в плазмохимическом реакторе коаксиальной геометрии, позволяющем реализовать все перечисленные типы коронного разряда при одинаковых условиях.

Эксперимент. В исследованиях использовалась охлаждаемая водой разрядная ячейка коаксиальной геометрии (рис. 1), состоящая из

коронирующего провода диаметром $d=0,25$ мм, натянутого по оси цилиндрического электрода с внутренним диаметром $d=57$ мм, диэлектрических заглушек, и рубашки водяного охлаждения. Осушенный силикагелем кислород или воздух с известным расходом (в интервале 0–1 л/мин) вводится в один из торцов цилиндрического электрода, а полученная озон-кислородная смесь подается в оптический анализатор озона.

Зажигание в разрядной ячейке положительной или отрицательной короны производится при подаче на коронирующий провод высокого напряжения соответствующей полярности, регулируемого в интервале от 10 до 20 кВ. В этих режимах ключ К (рис. 1) замкнут, и корпус озонирующего блока оказывается заземленным. Наличие в схеме питания тиратрона ТГИ – 500/16 и генератора запускающих импульсов позволяет реализовать импульсный коронный разряд положительной полярности с заданной частотой (0–15 кГц) повторения. Физические явления и схема реализации импульсной короны, используемая в исследованиях, подробно рассмотрены в [9].

Путем измерения мощности разряда, концентрации получаемого озона и расхода плазмообразующего газа определяются характеристики синтеза озона в различных коронных разрядах.

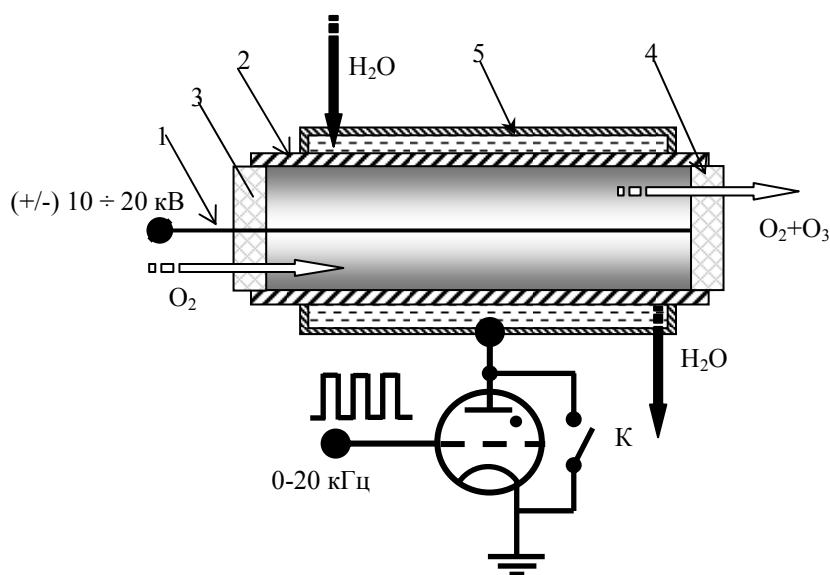


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – коронирующий провод $d=0,25$ мм; 2 – цилиндрический электрод $d=57$ мм; 3, 4 – диэлектрические заглушки; 5 – рубашка водяного охлаждения.

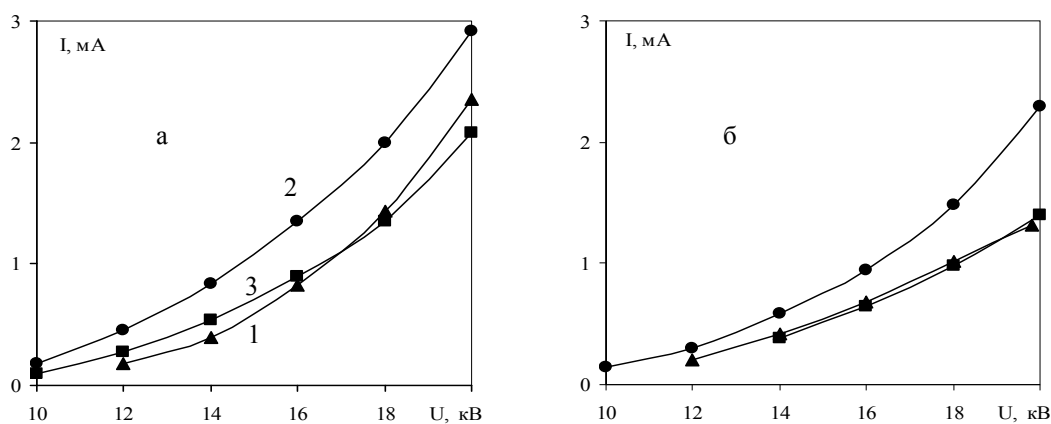


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики коронных разрядов:

а – в воздухе, б – в кислороде. 1, 2, 3 – импульсная, отрицательная и положительная короны.

Электрические характеристики. Вольт-амперные характеристики импульсной, отрицательной и положительной короны в воздухе и кислороде (рис. 2б) имеют типичный экспоненциальный характер. Сравнение зависимостей показывает качественную идентичность кривых тока в разных газах. При равных напряжениях ток отрицательной короны всегда наибольший, ток положительной и импульс-

ной короны мало отличаются друг от друга. Общее уменьшение тока в различных коронных разрядах при переходе от воздуха к кислороду определяется следующими причинами: кислород и озон являются электроотрицательными газами, связывающими свободные электроны, поэтому при увеличении концентрации данных газов средний ток разряда уменьшается. Подобные зависимости наблю-

даются также для озонаторов на барьерном типе разряда [10].

Синтез озона. Зависимости концентрации озона от напряжения для импульсной отрицательной и положительной коронных разрядов в воздухе показаны на рис. 3. При горении разных типов коронного разряда в воздухе наибольшая концентрация озона получается в импульсной положительной короне. Менее эффективна для синтеза озона отрицательная корона. В положительной короне озона образуется почти в десять раз меньше, чем в импульсной. Максимальные концентрации озона ($3,8 \text{ г/м}^3$) в исследуемой разрядной ячейке получают в импульсной короне при напряжении на разряде 20 кВ

При работе на кислороде (рис. 3) концентрация озона при равных напряжениях получается в 1,5–2 раза выше по сравнению с горением этих разрядов в воздухе. При этом отличия в величинах концентрации озона у разных разрядов менее существенные, чем на воздухе. Порядок убывания концентрации озона для разных разрядов изменяется. Так при напряжении 20 кВ наибольшая концентрация озона ($7,6 \text{ г/м}^3$) по-прежнему наблюдается для импульсной положительной короны, в положительной короне образуется до 6 г/м^3 и последняя в списке отрицательная корона (5 г/м^3).

Таким образом, использование кислорода для синтеза озона вместо воздуха позволяет

существенно увеличить (2–20 раз в зависимости от типа коронного разряда) эффективность работы плазмохимического реактора.

Из полученных зависимостей следует, что относительно высокие концентрации озона в кислороде или воздухе целесообразно получать в импульсном коронном разряде. При отсутствии необходимого оборудования для питания импульсной короны, синтез озона из воздуха нужно вести в отрицательной короне. Если плазмообразующий газ кислород, то предпочтение необходимо отдать положительной короне.

Удельные энергозатраты. Сравнение удельных энергозатрат на синтез озона показывает, что при работе на воздухе (рис. 4) наименьшие энергозатраты наблюдаются для импульсной положительной короны ($20 \text{ кВт}\cdot\text{ч/кг}$ при напряжении 20 кВ). В отрицательной короне при тех же напряжениях энергозатраты возрастают до $340 \text{ кВт}\cdot\text{ч/кг}$. Энергозатраты в положительной короне при аналогичных условиях составляют $930 \text{ кВт}\cdot\text{ч/кг}$. В промышленном синтезе озона приняты показатели синтеза озона на уровне $10\text{--}30 \text{ кВт}\cdot\text{ч/кг}$. Поэтому из приведенных зависимостей следует, что для генераторов озона из воздуха, работающих на основе коронных разрядов, необходимо использовать только импульсный коронный разряд положительной полярности.

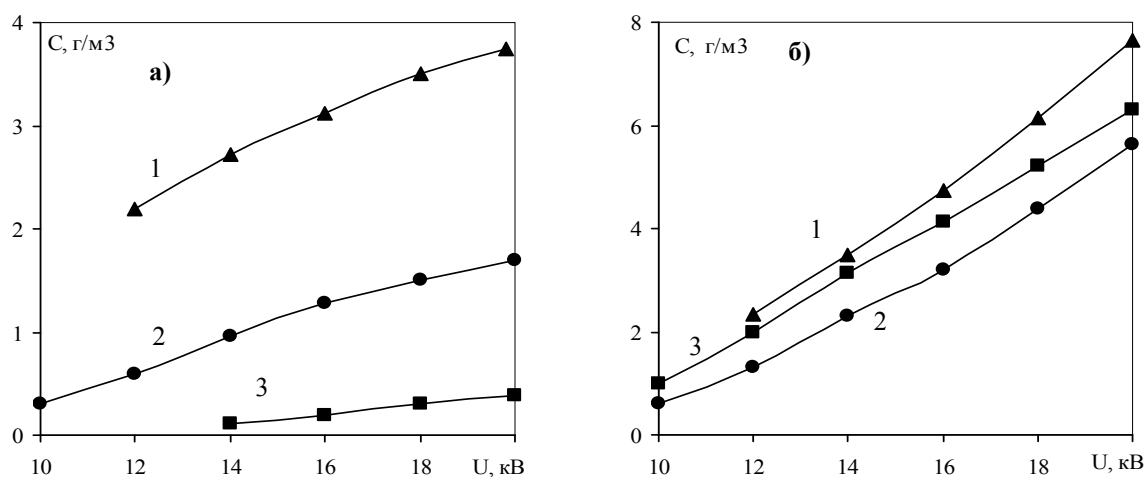


Рис. 3. Зависимости концентрации озона от напряжения для коронных разрядов: а – в воздухе, б – в кислороде. 1, 2, 3 – импульсная, отрицательная и положительная короны.

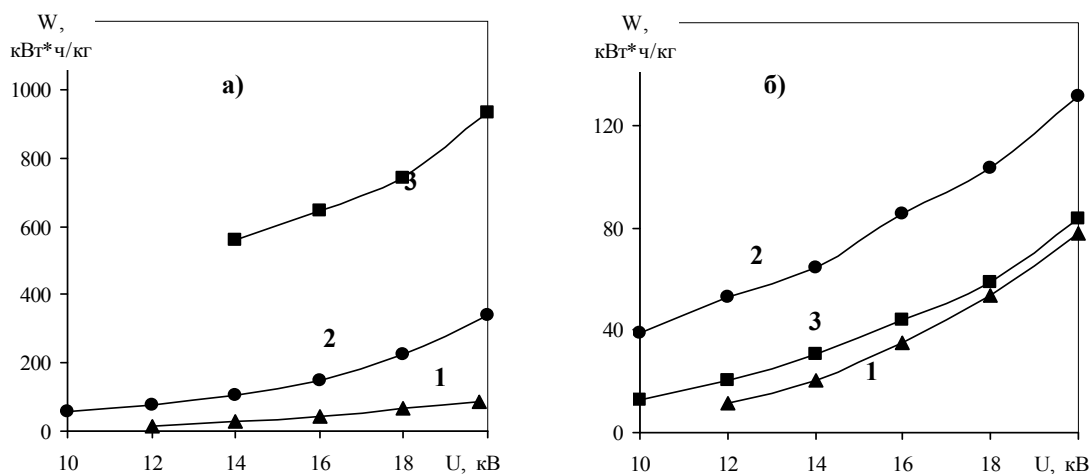


Рис. 4. Зависимость удельных энергозатрат на синтез озона от напряжения для коронных разрядов: а – в воздухе, б – в кислороде. 1,2,3 – импульсная, отрицательная и положительная короны соответственно.

Использование для синтеза озона кислорода позволяет существенно сократить удельные энергозатраты в отрицательной и положительной короне (рис. 4). В отрицательной короне энергозатраты уменьшаются до 130 кВт*ч/кг при напряжении 20 кВ. В случае положительной короны кислород позволяет сократить энергозатраты в 12 раз. Для импульсной короны наблюдается увеличение затрат на синтез озона по сравнению с воздухом в 3,5 раза.

Из данных зависимостей следует, что из кислорода рентабельно получать озон в положительной и импульсной короне в интервале напряжений на разряде 10–16 кВ. При этом концентрация озона будет изменяться в диапазоне 1–4 г/м³.

Анализ результатов (рис. 3, 4) параметров синтеза озона показывает, что не зависимо от рода используемого газа (воздух или кислород), наиболее экономичный синтез озона происходит в импульсной положительной короне. Минимальная величина удельных энергозатрат составляет 13 кВт*ч/кг при синтезе озона из воздуха. Высокая экономичность синтеза озона в импульсной короне достигается, во-первых, за счет того, что при равных напряжениях ток импульсной короны, а значит и выделяемая мощность в разряде, оказываются наименьшими по сравнению с другими разрядами, во-вторых, импульсная корона имеет

стримерный характер [11, 12]. Последнее обстоятельство играет наиболее существенную роль. Известно, что основная наработка активных частиц происходит в головке стримера и области, непосредственно к ней прилегающей [13]. Поэтому в режиме частичного замыкания разрядного промежутка стримерным каналом (не переходящим в искру) происходит увеличение абсолютной наработки активных частиц на порядок величины по сравнению с режимом обычного коронного разряда. Это обусловлено увеличением наработки электронно-возбужденных состояний в области головки стримера, распространяющегося в более высоком внешнем поле.

Выводы

- Из исследованных коронных разрядов с коаксиальной геометрией разрядного контура, наиболее оптимально синтез озона происходит в плазмохимическом реакторе на основе импульсного коронного разряда положительной полярности.
- При синтезе озона из воздуха предпочтение нужно отдавать отрицательной и импульсной короне.
- В кислороде более эффективно генерация озона осуществляется в положительной и импульсной короне.
- С экономической точки зрения промышленный синтез озона в рассмотренных ко-

ронных разрядах рентабелен только в случае получения низких концентраций озона (до 3 г/м^3).

Литература

1. *Першин А.Ф., Федорова А.В.* Озонаторы коронного разряда в медицине, пищевой промышленности и сельском хозяйстве // Мат. 3-го межд. конгр. "Вода: экология и технология" – ЕСWATECH-98. – М., 1998. – С. 671–672.
2. *Тышкевич Е.В.* Озон – мирное оружие 21 века. ПРООЗОН // Инф.-техн. изд. по озонным технол. – Минск, 2007. – №1(4). – С. 258.
3. *Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю., Мягков Б.И., Решидов К.К.* Очистка промышленных газов от пыли. – М.: Химия, 1981. – 392 с.
4. *Амиров Р.Х., Самойлов И.С., Шепелин А.В.* Синтез озона и разложение формальдегида в импульсной короне // Мат. конф. "Физика и техника плазмы". – Минск, 13–15 сентября, 1994. – С. 321.
5. *Амиров Р.Х., Асиновский Э.И., Самойлов И.С., Шепелин А.В.* Синтез озона в коронном разряде с комбинированным питанием // Применение электронных пучков и импульсных разрядов для очистки дымовых газов. – М., 1991. – С. 42–46.
6. *Коробцев С.В., Медведев Д.Д., Ширяевский В.Л.* Получение озона в коронном разряде на неосушенном воздухе // Мат. 25-го все-росс. сем. "Озон и другие, экологически чистые окислители. Наука и технология". – М.: МГУ, 2003. – С. 31–35.
7. *Голота В.И., Завада Л.М., Котюков О.В., Поляков А.В., Пугач С.Г.* Повышение эффективности синтеза озона в системе электродов игла-плоскость с импульсным питанием // Вопросы атомной науки и техники. – 2006. – №5. – С. 91–94.
8. *Горденя Е.А.* О повышении эффективности генерации озона в стримерном коронном разряде // Письма в ЖТФ. – 1995. – Т. 21. – Вып. 17. – С. 28–32.
9. *Ашмарин Г.В., Лелевкин В.М., Токарев А.В.* Формирование линейного коронного факельного разряда // Физика плазмы. – 2002. – Т. 28. – №8. – С. 45.
10. *Филиппов Ю.В., Вобликова В.А., Пантелеев В.И.* Электросинтез озона. – М.: Изд-во МГУ, 1987. – С. 104.
11. *Ашмарин Г.В., Ким К.С., Токарев А.В.* Физика горения линейного коронного факельного разряда // Третий межд. симп. по теоретической и прикладной плазмохимии: Сб. матер. – Иваново, 2002. – С. 376.
12. *Ашмарин Г.В., Ким К.С., Токарев А.В.* О физических механизмах горения линейного коронного факельного разряда // Вестник КРСУ. – 2002. – Т. 2. – №2. – С. 49.
13. *Панчешный С. В., Собакин С.В., Стариковская С.М., Стариковский А.Ю.* Динамика разряда и наработка активных частиц в катодонаправленном стримере // Физика плазмы. – 2000. – Т. 26. – С. 1137.