

МЕТОДЫ И СПОСОБЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ КОРОННОГО РАЗРЯДА В ЖИДКОЙ СРЕДЕ

СҰЙЫҚ ОРТАДА ТӘЖДІ РАЗРЯДТЫҢ ҚОЗУ ӘДІСТЕРІ МЕН ТӘСІЛДЕРІ

METHODS AND MEANS OF EXCITATION CORONA DISCHARGE IN A LIQUID MEDIUM

*A.S. АБИШОВА**, *Ш.А. БАХТАЕВ***, *Н.Ж. ЕСЕНГАБЫЛОВА****
*A.S. ABISHOVA**, *Sh.A. BAKHTAYEV***, *N.J. ESENGABYLOVA****

(*Алматинский технологический университет; **Алматинский университет энергетики и связи;
***КазНТУ им. К.И.Сатпаева)

(*Алматы технологиялық университеті; **Алматы энергетика және байланыс университеті;
***Қ.И.Сатпаев ат. ҚазҰТУ)

(*Almaty Technological University; **Almaty University of Energy and Communication;
***KazNTU K.I.Satpayev)

E-mail: aigul_slanbekovna@mail.ru

Рассмотрены известные методы и способы возбуждения электрического разряда в жидкостях. Предложено устройство для получения озона в жидкой среде, основанное на возможности возникновения коронного разряда в пузырьке газа.

Бұл жұмыста сұйықтарда электр разрядының қозуының белгілі әдістері мен тәсілдері қарастырылған. Тәжді разрядтың газ көпіршіктерінде пайда болу мүмкіншілігіне негізделіп, сұйық ортада озон алуға арналған құрылғы ұсынылған.

Describes known methods and techniques for of excitation of the electric the discharge in liquids. A device for ozone in liquid medium, based on possibility of occurrence corona discharge in the gas bubble.

Ключевые слова: коронный разряд, возбуждение, игла, озон, озонаторы, микропроволока, активные компоненты, жидкость, пузырьки газа.

Негізгі сөздер: тәжді разряд, қозуы, ине, озон, озонатор, микросым, белсенді компоненттер, сұйық, газ көпіршіктері.

Key words: corona discharge, agitation, needle, ozone, ozone generators, microwires, the active components, liquid, gas bubbles.

Введение

Образование озона в электрических разрядах является одним из главных методов его получения, и практически он остается единственным для промышленного производства озона. Наиболее благоприятные условия для синтеза озона создаются при отрицательном коронном разряде, когда в качестве коронирующих электронов служат микропроволока или острие. Коронный разряд на микроэлектродах обладает рядом преимуществ по сравнению с другими видами электрических разрядов: малый

рабочий объем образования озона, отсутствие влияния давления и скорости протекающего воздуха на процессы образования озона, необходимость воздухоподготовки [1].

Главным недостатком традиционных схем применения озона является некоторая отдаленность озонатора от места реакционной зоны взаимодействия озона с обрабатываемым объектом, что снижает в несколько раз эффективность применения озона. В пути при транспортировке озона намного снижается концентрация самого озона, и при этом, отсутствуют другие

химически активные компоненты кислорода (метастабильные атомы и молекулы кислорода), образуемые в коронном разряде. Известно, что озон и активные компоненты кислорода наиболее эффективно образуются в зоне коронного разряда и в каналах микрозарядов барьерного разряда [2].

Известен электрогазодинамический озонатор, содержащий цилиндрический внешний электрод и внутренний коронирующий электрод в виде иглы, расположенные осесимметрично, выполнен в виде четырех последовательно расположенных камер: входной камеры ламинаризации потока кислородсодержащего газа, камеры образования озона, конусной камеры гашения скорости потока газа и выходной камеры нейтрализации ионов озона, причем, дополнительный сеточный электрод для усиления поля установлен напротив коронирующей иглы на расстоянии, равном радиусу внешнего электрода [3]. Основным недостатком озонатора является то, что несмотря на высокую скорость потока газа, высокоактивные атомы и молекулы кислорода (синглетный кислород, возбужденные атомы и молекулы кислорода), кроме озона, из-за их малого времени жизни остаются в самой камере озонатора и не доходят до реакционной зоны для взаимодействия с объектом.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является коронный разряд в жидкой среде.

Основной целью исследования является разработка методов и способов для возбуждения коронного разряда в жидкой среде. В этом случае создаются условия возникновения коронного разряда в пузырьке газа в жидкой среде, что позволяет получить озон и другие высокоактивные атомы и молекулы кислорода.

Для этого служит коронирующий электрод в виде иглы, который помещается в жидкость, насыщенную пузырьками газа.

Результаты и их обсуждения

В предлагаемом устройстве используется коронный разряд между двумя электродами в виде иглы с малым радиусом кривизны и в виде металлического полушара, когда разрядный промежуток продувается кислородосодержащим газом с довольно высокой скоростью. В зоне коронного разряда наиболее быстрым и вероятным процессом является возбуждение электрон-

ных состояний молекулы O_2 ($^3\Sigma_u^+$ и $^3\Sigma_u^-$) с колебательным возбуждением, превышающим порог диссоциации. При этом, распад состояния $O_2(^3\Sigma_u^-)$ приводит к образованию атома в нормальном состоянии $O(^3P)$ и атома в метастабильном состоянии $O(D)$. Кроме того, в результате неупругих соударений электронов с молекулами кислорода в чехле коронного разряда образуются атомы кислорода в основном и возбужденном состояниях, метастабильные молекулы $O_2(^1\Delta_g)$, $O_2(v^1\Sigma_g^+)$, озон и ионы кислорода. Установлено, что высокой окислительной активностью при низких температурах обладают $O(^3P)$, $O_2(^1\Delta_g)$ и O_3 , которые могут позволить получить некоторые трудноосуществимые химические реакции в технологических жидкостях. Остается рассмотреть вопрос о выборе скорости потока газа для обеспечения своевременной доставки этих компонентов в реакционную зону в соответствии с их продолжительностью жизни.

При учете продолжительности жизни активных компонентов кислорода необходимо обратить внимание, в первую очередь, на метастабильные атомы и молекулы кислорода, которые, находясь в наиболее низком возбужденном состоянии, имеют достаточную продолжительность жизни, чтобы успеть среагировать с объектом. Например, известны времена жизни следующих метастабильных атомов и молекул кислорода: $O(^1S)$ – 0,74сек, $O(^1D)$ – 110сек, $O^+(2P)$ – 4,8сек, $O_2(^1\Delta_g)$ – 2700сек, $O_2(v^1\Sigma_g^+)$ – 12 сек. Исходя из этих данных, скорость потока кислородсодержащего газа может быть выбрана равной или больше отношения расстояния от места возникновения активного компонента до реакционной зоны к значению его времени жизни.

Предлагаемый авторами способ реализуется в электропроводящих жидкостях (водные растворы, кислотные и щелочные соединения) и преимущественно насыщенных пузырьками газа.

Коронирующий электрод в виде иглы, с высокой кривизной поверхности, покрывают диэлектрическим слоем и оставляют оголенным только кончик иглы (острие), после чего помещают его в жидкость, насыщенную пузырьками газа. При протыкании газового пузырька острием иглы коронирующего электрода создается условие для возбуждения коронного разряда между острием иглы и внутренней сферической

поверхностью пузырька газа. Для повышения эффективности этого действия острие иглы электрода обычно располагают против направления течения или всплывания пузырьков газа в жидкости. В момент протыкания пузырька газа острием иглы включается зарядное устройство, которое доводит напряжение питания отрицательной полярности до возникновения коронного разряда в пузырьке газа. Время заряда и разряда напряжения питания устанавливается таким образом, что оно не превышает время нахождения пузырька газа на оголенном острие коронирующего электрода. При прохождении тока коронного разряда в газовом пузырьке образуются высокоактивные частицы газа, которые реагируя с жидкостью, подвергают ее физико-химической обработке.

Устройство содержит коронирующий электрод, зарядное устройство, нагрузочное сопротивление и источник питания отрицательной полярности. Коронирующий электрод, покрытый диэлектрическим слоем и с оголенным острием помещают в жидкость, где могут к нему прилипать и отлипать пузырьки газа. Приняты следующие обозначения: U_0 и T_1 – напряжение на острие и время появления пузырька газа, U_k и T_2 – напряжение и время возникновения коронного разряда, T_3 – время отрыва пузырька от острия, T_4 – время окончания разрядки устройства, $\Delta T_n = T_3 - T_1$ – время нахождения пузырька на острие, $\Delta T_k = T_3 - T_2$ время коронирования острия электрода, r – радиус полушара острия иглы, R – радиус пузырька газа, V_b – скорость всплывания пузырька газа, V_t – скорость течения потока жидкости.

При отсутствии пузырька газа на кончике иглы коронирующий электрод закорочен через электропроводящую жидкость с земляной шиной источника питания. В этом режиме через коронирующий электрод течет минимальный ток, который создает падение потенциала на острие, равное U_0 . Когда на острие электрода появляется пузырек газа, контакт острия с жидкостью резко срывается (T_1) и начинается зарядка устройства. При достижении потенциала на острие значения U_k в пузырьке газа возникает отрицательный коронный разряд, который протекает до момента T_3 , когда происходит отрыв пузырька с острия электрода. После отрыва пузырька с острия коронирующий электрод снова закорачивается через жидкость с

земляной шиной и наступает период ожидания следующего пузырька газа. Время заряда и разряда устройства находится в прямой зависимости от скорости прохождения острия иглы пузырьками газа и от их размеров, причем, следует отметить, что выбор значений R_1 и U также будут определяться этими величинами.

В связи с этим необходимо произвести оценочные расчеты параметров пузырька газа в жидкости и определить электростатическое поле сферического конденсатора, когда его внутренним электродом является острие иглы с радиусом кривизны r_0 , а внешним электродом – внутренняя сферическая поверхность пузырька газа с радиусом R .

Для простоты рассмотрения приведем два случая поведения пузырьков газа в жидкости и охвата их острия иглы коронирующего электрода. В первом случае, когда острие иглы располагают против течения потока жидкости, газовые пузырьки, имея такую же скорость как жидкость V_t , протыкают острие и в течение времени $\Delta T_n = 2R/V_t$ находятся там. Скорость всплывания пузырьков газа V_b для случая, когда они образуются принудительным дутьем, определяется следующей приближенной формулой, которая справедлива для случая $R > 1$ мм:

$$U_b = \sqrt{8Rg/3} \approx \sqrt{R}, \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения, равное 10 м/сек^2 [7]. В этом случае время нахождения пузырька на острие иглы будет приближенно равно $\Delta T_n = 2\sqrt{R}$. В этом и в других случаях промежуток времени, когда пузырек находится на острие, определяет длительность разрядных процессов в пузырьке газа и, следовательно, по его величине рассчитываются параметры разрядного устройства.

Главным моментом для возникновения коронного разряда в пузырьке газа является начальная напряженность поля E_k , которая определяется как напряженность поля на поверхности острия иглы коронирующего электрода. Экспериментальные зависимости E_k в воздухе хорошо аппроксимируются уравнением:

$$E_k = A\delta(1 + B/\sqrt{r\delta}) \quad (2)$$

где $B = 1,5$; $A = (5 \div 6,5) \text{ кВ/см}$ (для

отрицательного коронного разряда); δ - относительная плотность воздуха, равная для Алматы 0,9 [8].

Таким образом, расчетная формула значений E_k выглядит следующим образом:

$$E_k = 4,5 + 7,12\sqrt{r}, \quad (3)$$

где: E_k в кВ/см, r - см.

Известно, если расстояние до внешнего электрода значительно больше радиуса кривизны коронирующего электрода в виде острия, то электрическое поле сконцентрировано вблизи острия, а напряженность на его

поверхности определяется, в основном, отношением приложенного напряжения к радиусу кривизны острия ($E \approx U/r$) и мало зависит от межэлектродного расстояния (R). Это позволяет, при сравнительно небольших напряжениях и малых межэлектродных расстояниях, получать высокие E на острие электрода, что обеспечит появление интенсивного коронного разряда.

Исходя из общеизвестных закономерностей, приведем выражения для определения времени зарядки и разрядки устройства:

$$T_2 - T_1 = R_2 c \ln (U - U_0 / U - U_k); \quad T_4 - T_3 = R_1 c \ln (U_m / U_0), \quad (4)$$

где U_m – максимальное напряжение на острие электрода, которое достигается при протекании коронного разряда в пузырьке ($T_3 - T_2$).

Приведенные выражения (1–4) позволяют выполнить оценочные расчеты и сравнить их с экспериментальными данными, полученными на одном из вариантов устройства, реализующего предложенный способ получения коронного разряда в жидкости.

Для сравнения с экспериментальными данными были произведены оценочные расчеты всех параметров устройства при постоянстве радиуса кривизны острия коронирующего электрода ($r = 0,05\text{см}$) и для трех размеров пузырьков газа (таблица). При этом получены: $U_k = 1,82\text{ кВ}$, $E_k = 36,42\text{ кВ/см}$. По данным таблицы 1 выбрано значение напряжения источника питания $U = 5,4\text{ кВ}$.

Таблица 1 - Расчетные оценки параметров устройства

R, см	0,1	0,2	0,3
ΔT_p , сек	0,063	0,089	0,109
R_1 , кОм	100	100	100
R_2 , кОм	300	400	500
C, мкФ	0,1	0,1	0,1
$T_2 - T_1$, сек	0,015	0,022	0,027
$T_4 - T_3$, сек	0,048	0,067	0,082

Исходя из данных таблицы, было собрано устройство на одиночных пузырьках воздуха, всплывающих в воде. Пузырьки воздуха создавались с помощью микрокомпрессора, а коронирующий электрод располагался в воде в вертикальном положении. Коронирующий электрод представляет собой проволоку из нержавеющей стали диаметром 1 мм, которая помещена в стеклянный капилляр и конец ее затуплен под полушар. Напряжение питания составило 5,4 кВ, а зарядное устройство имело следующие параметры: $C = 0,1\text{ мкФ}$, $R_1 = 100\text{ кОм}$, $R_2 = 400\text{ кОм}$. Размеры всплывающих пузырьков колебались от 0,3 до 0,5 см, причем, протыкание их острием иглы также неравномерно.

Опытные испытания устройства показали следующее. В период ожидания напряжение U_0 составило не более 1 В, т.е. ток, который течет при замкнутом состоянии электрода с жидкостью, определяется значениями R_1 и R_2 . В момент прохождения пузырька воздуха через иглу электрода появляется импульс тока длительностью 0,1 сек с амплитудой порядка 2 кВ, что достаточно для возникновения коронного разряда, т.к. коронный разряд в пузырьке

воздуха является маломощным, и свечение его наблюдается только в темноте. Следует отметить, что свечение разряда также носит статистический характер.

Другое устройство, предлагаемое авторами, позволяет вести физико-химическую обработку технологических растворов и жидкостей, где окислительные процессы слабо протекают с озоном и совсем не протекают с обычным кислородом. Для этого устройство помещается в жидкость или раствор и через него создается избыточное давление кислородсодержащего газа (воздух, кислород), что ведет к барботажу жидкости. После чего, при подаче достаточно высокого напряжения между электродами устройства возникает электрический разряд, который ведет к образованию озона и других высокоактивных атомов и молекул кислорода, попадающих вместе с потоком газа в жидкость.

Устройство содержит металлический корпус в виде цилиндра, на который насажен металлический полушар с отверстиями, служащий в качестве внешнего электрода. Коронирующий электрод в виде иглы расположен осесимметрично с внешним цилиндром корпуса и находится в центре полушарового электрода. Иглодержатель крепится соосно к корпусу с помощью диэлектрического кольца с отверстиями для прохождения потока газа, который нагнетается в корпус через входную трубку. Корпус устройства помещается в рабочий объем с жидкостью.

Устройство представляет собой длинную трубу и может быть помещено в любом положении и в любом месте рабочего объема с жидкостью. В корпус нагнетается кислородосодержащий газ, который проходя через отверстия, попадает в жидкость и барботирует ее. После установки стабильного режима барботируемой жидкости между электродами подается напряжение достаточной величины для возникновения и протекания коронного разряда. Полученные в разрядном промежутке активные компоненты кислорода и озон с помощью протекающего газа через отверстия доставляются в реакционную зону жидкости, причем, скорость потока газа рассчитывается по значениям расхода газа через устройство и по внутреннему сечению цилиндра корпуса. Ввиду того, что разрядный промежуток имеет сложную сферическую конфигурацию, это может вести к ошибке при определении скорости потока. Поэтому, практически значение

скорости потока берется с запасом и устанавливается намного больше, чем необходимо.

В связи с тем, что окислительное действие озона на органические соединения общеизвестно [9], а изучение процессов взаимодействия других химически активных компонентов кислорода находится в начальном этапе, предложенное устройство было экспериментально проверено в рабочем объеме с водой без определения концентраций и степени взаимодействия активированного кислорода (кроме озона) на органические и другие вещества. Устройство имеет следующие параметры: радиус иглы – 0,1мм, радиус полушара равен 5мм, диаметры отверстий (5шт.), симметрично расположенных по полушару, равны 3 мм, диаметр внутреннего цилиндра корпуса – 10мм, отверстия (6шт.) в диэлектрическом кольце имеют диаметры по 2мм, а иглодержатель представляет собой капиллярную трубку из стекла с наружным диаметром 4мм. При напряжении питания отрицательной полярности на коронирующем электроде ток разряда равен 1,2 мА, что обеспечило производительность по озону 0,2 г/ч при потребляемой мощности 5Вт.

Микрокомпрессор обеспечивает расход воздуха через устройство порядка 15м³/ч, что позволяет получить скорость потока воздуха внутри корпуса, равную 0,05м/с. При такой скорости обеспечивается доставка в реакционную зону активного компонента кислорода с минимальным временем жизни 0,1 с. Концентрация озона на выходе устройства составила 14 мг/м³, а предварительные расчеты концентраций O(³P) и O₂(¹Δg) на выходе дали 0,2 и 0,6 доли озона, соответственно.

Таким образом, устройство обеспечивает стабильность режима процессов образования активных компонентов кислорода в коронном разряде и своевременность их доставки в реактивную зону в жидкости. Кроме того, предлагаемое устройство ввиду существующей возможности регулирования расхода воздуха через устройство, что то же самое возможности выбора времени доставки активного компонента, создает условие для ведения избирательной реакции того или иного компонента кислорода с объектом.

Заключение

Разработан наиболее эффективный метод получения озона и других высокоактивных атомов и молекул кислорода в среде обрабатываемой жидкости. Новизна метода подтверждена двумя предпатентами

РК. Присутствие активных компонентов кислорода в коронном разряде в пузырьке газа позволяет получить некоторые трудно осуществимые химические реакции в технологических жидкостях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бахтаев Ш.А. и др. Озонаторы на коронном разряде. Аналит. обзор/ КазгосИНТИ, 1998. -30с.
2. Бахтаев Ш.А., Бокова Г.И., Утеуов М.Х. Условия получения коронного разряда в жидкости // Вестник АГУ. Сер. физ.-мат. -№1 (3), 2001. - С 22-25.
3. Предпатент РК № 8625. Электрогазодинамический озонатор//Бахтаев Ш. А. и др. Оpubл. Бюлл.№3, 15.03.2000.
4. Ушаков В.Я. Импульсивный электрический пробой жидкостей. –Томск: Изд-во ТГУ, 1975. -113с.
5. Скорых В.В. Влияние пузырьков газа на зажигание разряда в воде // ЖТФ.-Т.56.-№8.- С.1569-1572.
6. А.С.№ 316646.СССР. Озонатор//Дмитриев А.В., Преснецов Г.Н. Оpubл. Бюлл.№30,1971.
7. Гегузин Я.Е. Пузыри. М.: Наука, 1985. -176 с.
8. Бахтаев Ш.А. Коронный разряд на микропроводах. -Алма-Ата: Наука, 1984. -208с.
9. Разумовский С.Д., Заиков Г.Е. Озон и его реакции с органическими соединениями (кинетика и механизм). -М.: Химия, 1974. -322с.