

04;12

Выбор условий электрического разряда при генерировании химически активных частиц для разложения примесей в воде

© И.М. Пискарев

Институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына,
119899 Москва, Россия

(Поступило в редакцию 24 ноября 1997 г.)

Рассмотрен электрический разряд между поверхностью жидкости и электродом, расположенным над ней. Вторым электродом, подводящим питание от высоковольтного источника, расположен на дне сосуда с жидкостью. Проанализированы условия, которым должен удовлетворять электрический разряд, чтобы обеспечить эффективное инициирование реакций в жидкой фазе. В этих условиях количество активных частиц, генерируемых разрядом, оказывается зависящим от концентрации в жидкости вещества, с которым взаимодействуют активные частицы. Показано, что в случае коронного или искрового разряда реакции могут проходить в слое жидкости толщиной 10–20 мм и для конкретных реакций существует оптимальная величина напряженности электрического поля, при которой энергетические затраты на инициирование реакции будут минимальными.

Введение

Плазма электрического разряда может быть использована как источник возбужденных частиц, инициирующих химические реакции для осуществления их в промышленных масштабах [1]. В литературе рассматривались различные возможности для генерирования таких активных частиц. Среди них для инициирования реакций в газовой фазе можно выделить высокочастотный разряд в воздухе при пониженном давлении [2], электроионизационный [3], коронный [4] и тлеющий [5] разряды при атмосферном давлении, импульсный стримерный разряд [6]. Для инициирования реакций в жидкости рассматривались тлеющий разряд при пониженном давлении газа над поверхностью жидкости [7,8], известный как электролиз в тлеющем разряде, импульсный разряд в жидкости [9], озонирование [10,11] и вместо озонирования продувание через жидкость газа, содержащего синглетный кислород [12].

В работах [13,14] был предложен новый подход к проблеме инициирования реакций в жидкости с использованием активных частиц, образующихся в газовой фазе, основанный на том, что используется электрический разряд постоянного тока при высокой напряженности электрического поля и малой плотности тока. При этом создаются условия, когда в самой жидкости имеется электрическое поле. Новый вид реакций, инициируемых в этих условиях, предложено называть безэлектродными.

В настоящей работе рассмотрены условия, при которых активные частицы, генерируемые в газовой фазе, могут эффективно инициировать реакции в жидкости. Приводятся результаты экспериментов, иллюстрирующие возможности нового подхода к решению задачи.

Условия эксперимента

Блок-схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Разряд проводили в стеклянном цилиндрическом сосуде 13 в площадь основания 10 cm^2 , высота сосуда до уровня пробки составляла 36 мм. В отдельных экспериментах использовался сосуд подобной формы, но с объемом 300 мл. Через отверстие в дне сосуда вводился электрод из платиновой проволоки диаметром 0.2 мм, имеющий контакт в жидкость (контактный электрод 9). Сосуд закрывался тefлоновой пробкой 12, имеющей отверстия для ввода разрядного электрода 8, располагавшегося над поверхностью жидкости, и двух стеклянных трубок для продува воздуха. Продув воздуха осуществлялся для поддержания постоянного состава газа при длительной работе. Скорость продува составляла $\sim 0.5 \text{ cm}^3/\text{min}$. Разрядный электрод из платиновой проволоки диаметром 0.2 мм монтировался на стеклянном изоляторе. Толщина слоя жидкости в сосуде менялась от 5 до 30 мм, причем для данной площади основания сосуда высота слоя жидкости, выраженная в мм, оказывалась численно равной объему жидкости в мл. На электроды через балластное сопротивление $11 \text{ m}\Omega$, включенное в цепь разрядного электрода, подавалось напряжение до 14 кВ. Величина среднего тока измерялась при помощи миллиамперметра, включенного в цепь контактного электрода (на рисунке не показан). Для наблюдения формы тока разряда в цепь контактного электрода включался делитель на сопротивлениях и осциллограф. При осуществлении реакций делитель отключался и контактный электрод соединялся с землей через миллиамперметр. Емкость разрядного электрода относительно земли составляла от минимального значения в несколько пФ, определяемого емкостью монтажа, до $0.025 \text{ }\mu\text{F}$.

Условия электрического разряда

1) Концентрация активных частиц. Рассмотрим отновные требования к разряду, предназначенному для инициирования реакций в жидкости, на примере двухчастичной реакции. Пусть в объеме газа генерируются активные радикалы R^\bullet , а в жидкости имеется вещество B , взаимодействие которого с радикалами R^\bullet нас интересует. Тогда, как было показано в работе [15] скорость реакции будет определяться соотношением $w_1 = Ak_1[B][R^\bullet]$, где k_1 — константа реакции, A — относительная толщина активного слоя жидкости, в котором происходит взаимодействие радикалов из газовой фазы с веществом, растворенном в воде. Как показали расчеты [15], в случае воды абсолютное значение толщины активного слоя составляет $\sim 50 \mu\text{m}$. Расчет в работе [15] был выполнен при условии, что реакция происходит в слое толщиной A и по мере расходования вещества в этом слое его содержание пополняется так, что средняя концентрация по всему объему жидкости всегда остается постоянной.

Активные радикалы R^\bullet , образующиеся в газовой фазе, могут расходоваться при взаимодействиях между собой образуя неактивные продукты, со скоростью

$w_2 = k_2[R^\bullet]^2$. Чтобы не допустить значительной потери активных частиц, необходимо выполнить условие $w_2 \ll w_1$ или

$$[R^\bullet] \ll A [B] \frac{k_1}{k_2}, \tag{1}$$

т.е., для того чтобы активные радикалы расходовались в основном на взаимодействие с примесью, содержащейся в воде, их концентрация должна зависеть от концентрации примеси и быть достаточно малой. Пусть толщина обрабатываемого слоя жидкости равна 20 mm (относительная толщина $A = 2.5 \cdot 10^{-3}$) и положим $k_1 = k_2$, а концентрацию примеси примем равной $[B] \sim 10^{-3} \text{ mol/l}$, тогда $[R^\bullet] \ll 2.5 \cdot 10^{-9} \text{ mol/cm}^3$ или концентрация радикалов должна быть существенно меньше 10^{15} частиц в 1 cm^3 . Такая плотность частиц характерна для слабоионизованной плазмы коронного или слаботочного искрового разряда (ток $\sim 1 \text{ mA}$).

2) Размер газовой полости. Рассмотрим требования к объему газовой фазы и форме полости с газом. Пусть в объеме при электрическом разряде образуется в единицу времени R_0^\bullet радикалов. Их концентрация будет $[R_0^\bullet]/V$, где V — объем газа. Гибель радикалов будет происходить со скоростью $k_2([R_0^\bullet]/V)^2$, а расходование на реакции в жидкости со скоростью $Ak_1[B]([R_0^\bullet]/V)$. Условие (1) примет вид

$$[R_0^\bullet] \ll A [B] \frac{k_1}{k_2} V. \tag{2}$$

Отсюда следует, что при определенной скорости образования активных радикалов всегда можно выбрать такой маленький объем газовой фазы, когда условие (2) не может быть выполнено и образующиеся радикалы будут погибать преимущественно при взаимодействиях между собой, т.е. объем газовой полости должен быть не слишком малым и в конкретных случаях может возникать необходимость его увеличения.

Если частицы будут гибнуть на стенках (это относится в первую очередь к частицам в возбужденных состояниях), доля погибших частиц для случая газовой полости в форме цилиндра с радиусом r и высотой h будет

$$\frac{1}{2(1 + \frac{h}{r})}$$

Отсюда видно, что объем газовой полости при необходимости следует увеличивать за счет радиуса, оставляя минимальной ее высоту.

3) Механизм перемешивания жидкости. Реакция происходит в тонком поверхностном слое [15], поэтому нужно обеспечить эффективное перемешивание раствора во время реакции по мере расходования вещества в поверхностном слое. За счет только диффузии перемешивание жидкости будет происходить медленно. Для ускорения перемешивания жидкости использовано электрическое поле. Для этого на дне сосуда находится второй электрод. Электрическое поле, создаваемое за счет протекания постоянного тока разряда силой до 1 mA, может создать в жидкости

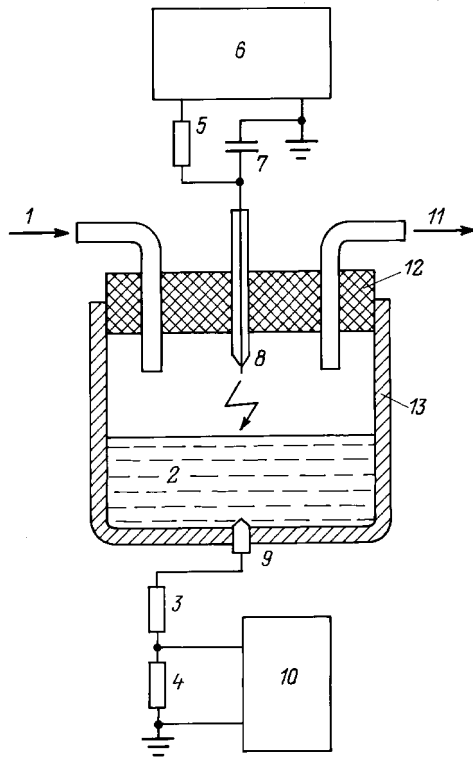


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки: 1, 11 — трубки для продува воздуха; 2 — обрабатываемая жидкость; 3, 4 — сопротивления, ($k\Omega = 160$ (3), 470 (4)); 5 — балластное сопротивление 11 MΩ; 6 — источник питания (1–14 kV); 7 — емкость разрядного электрода относительно земли; 8 — разрядный электрод; 9 — контактный электрод; 10 — осциллограф; 12 — тefлоновая пробка; 13 — стеклянный сосуд.

напряженность поля не более 1 V/cm . При такой напряженности поля скорость движения ионов составляет $\sim 0.3 \text{ mm/min}$ [16], т.е. перемешивание слоя раствора толщиной $\sim 10 \text{ mm}$ произойдет за время порядка 30 min .

Если разряд имеет импульсный характер, то для указанных выше напряжений в момент пробоя к слою жидкости прикладывается напряжение от сотен вольт до единиц киловольт. Тогда напряженность поля в жидкости будет в сотни раз больше, чем при постоянном токе, и характерное время перемешивания слоя $\sim 10 \text{ mm}$ будет составлять порядка 10 s , так как скорость движения ионов пропорциональна напряженности электрического поля [16], которое имеет в данном случае импульсный характер.

Дополнительным фактором, улучшающим перемешивание жидкости, является "электрический ветер" [4], имеющий нестационарный характер и образующий при коронном разряде на поверхности жидкости напротив разрядного электрода хаотически перемещающуюся воронку глубиной $2\text{--}3 \text{ mm}$.

4) Толщина слоя жидкости. Оценим толщину слоя жидкости, перемешивание которого возможно в ходе реакции. Механизмом перемешивания будет считать прохождение через жидкость импульсов электрического тока. Ток создается заряженными частицами, попадающими в жидкость при разряде и движущимися в жидкости по направлению к электроду, расположенному на дне сосуда. При искровом разряде участок поверхности, на который попадает искра, имеет площадь $\sim 1 \text{ mm}^2$. Заряд, попавший сюда во время очередного импульса, создает относительно земли потенциал до 5 kV (как показали прямые измерения амплитуды напряжения с помощью делителей 3, 4 на рис. 1). Движение этого заряда создает внутри жидкости распределение напряжения. Напряжение, падающее на слое жидкости при прохождении импульса тока, будет определяться сопротивлением участка жидкости, через который движутся заряды. По мере углубления в жидкость область локализации группы ионов, переносящих заряд, будет расширяться за счет рассеяния ионов на молекулах жидкости, сопротивление слоя жидкости будет уменьшаться и падение напряжения также будет уменьшаться. Если область, занимаемая ионами, будет подобна конусу с вершиной в точке попадания искры, то падение напряжения будет пропорционально $1/d^2$, где d — глубина слоя жидкости. При напряжении на разрядном электроде $5\text{--}10 \text{ kV}$ толщина слоя жидкости, который может эффективно перемешиваться в процессе реакции, может составить $10\text{--}20 \text{ mm}$ (при такой толщине напряжение на слое жидкости относительно земли уменьшается практически до нуля).

5) Мода электрического разряда. Из предыдущего следует, что важным фактором осуществления реакции в жидкости под действием электрического разряда является импульсный характер этого разряда. Для наблюдения формы тока при электрическом разряде использовался делитель на сопротивлениях 3, 4 и осциллограф 10 (рис. 1).

Коронный разряд наблюдался в условиях настоящего эксперимента при напряжениях на разряде от 7 до 14 kV и расстоянии от поверхности в искровой или тлеющей. Фактическое расстояние до жидкости было несколько больше, так как напротив электрода в жидкости образовывалась воронка от "электрического ветра" [4] глубиной $2\text{--}3 \text{ mm}$. Напряженность электрического поля достигала $\sim 5 \cdot 10^{-16} \text{ V/cm}^2$ (50 Td). Импульсный характер коронного тока наблюдался при напряжениях, не сильно превышающих порог зажигания коронного разряда [17], с дальнейшим повышением напряжения при малой величине емкости разрядного электрода относительно земли (порядка нескольких пикофарад) разряд переходил в тлеющий разряд постоянного тока с квазинейтральным плазменным столбом, как наблюдалось и в работе [18].

Чтобы сохранить импульсный характер тока коронного разряда, при котором обеспечивается наибольшая напряженность электрического поля, необходимо увеличить емкость разрядного электрода относительно земли до десятков микрофарад. В этом случае импульсный разряд емкости приводит к возрастанию тока, это приводит к падению напряжения на разрядном промежутке. Падение напряжения нарушает критерий самоподдержания разряда, и ток разряда падает. Импульсное падение напряжения предотвращает дальнейшее развитие разряда, поэтому корона оказывается "вспышечной" [17] с частотой повторения $\sim 100 \text{ kHz}$. Величина емкости и запасенный в ней заряд оказываются пока недостаточными для образования выраженного искрового канала, закорачивающего разрядный промежуток, и амплитуда импульса на поверхности жидкости оказывается порядка $100\text{--}200 \text{ V}$. Таким образом, чтобы предпробойный стример вспышечной короны не привел к образованию тлеющего разряда, нужна достаточно большая величина емкости, разряд которой обеспечит импульс тока, не позволяя установиться режиму с постоянным током. При дальнейшем увеличении емкости или значительном увеличении напряжения заряд, запасенный в емкости, оказывается достаточным для образования канала искры, поэтому корона становится неустойчивой и легко переходит в искру, частота повторения которой f будет зависеть от постоянной времени заряда и разряда емкости τ ($f \sim 100\text{--}1000 \text{ Hz}$). Максимально достижимая при искровом разряде напряженность электрического поля в данных условиях эксперимента (ограничение на средний ток разряда) оказывается примерно в два раза меньше, чем при коронном разряде.

Результаты эксперимента

1) Обесцвечивание раствора перманганата калия. Влияние характеристик разряда на особенности протекания реакции в жидкости изучалось для процесса обесцвечивания водного раствора перманганата калия. Возможным механизмом реакции является взаимодействие перманганата калия с перекисью водорода и азотной кислотой, образующимися

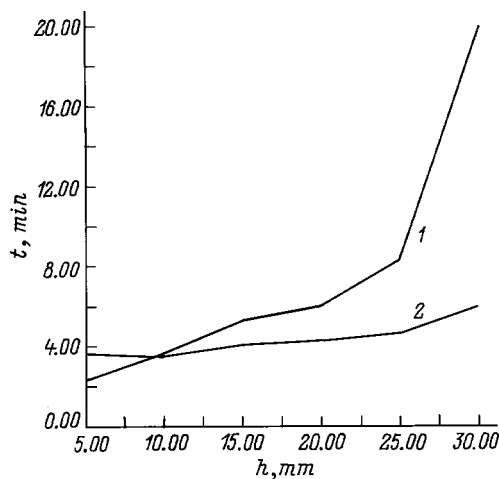


Рис. 2. Зависимость времени (t) обесцвечивания раствора, содержащего $3.8 \cdot 10^{-4}$ mol/l KMnO_4 (1) и $3.8 \cdot 10^{-6}$ mol KMnO_4 (2) от объема жидкости (h — толщина слоя жидкости).

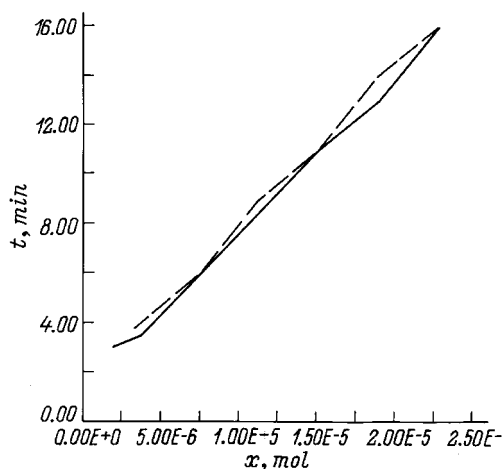


Рис. 3. Зависимость времени (t) обесцвечивания раствора объемом 10 (штриховая кривая) и 20 ml (сплошная) от содержания (x) KMnO_4 в растворе.

в газовой фазе. Не останавливаясь на деталях механизма реакции (механизм реакции всегда был одним и тем же), обсудим зависимости времени обесцвечивания от толщины слоя жидкости (толщина связана с диффузией частиц и перемешиванием раствора) и параметров разряда, которые определяют выход активных частиц, участвующих в данном процессе. В процессе реакции раствор полностью обесцвечивался, притом образование осадка не наблюдалось. В контрольном эксперименте было установлено, что полное обесцвечивание соответствует разложению более 99% исходного KMnO_4 . Измерялось время полного обесцвечивания раствора KMnO_4 до исчезновения признаков окраски и пропадаания осадка. Ошибка определения времени обесцвечивания не превышала 10%. На рис. 2 представлена зависимость времени обесцвечивания от толщины слоя жидкости для случая определенной концентрации ($3.8 \cdot 10^{-4}$ mol KMnO_4 , кри-

вая 1) и определенного одного и того же количества KMnO_4 в растворе ($3.8 \cdot 10^{-6}$ mol, кривая 2), толщина слоя регулировалась во втором случае добавлением воды. Видно, что при толщине слоя 20–25 mm время обесцвечивания жидкости, содержащей $3.8 \cdot 10^{-6}$ mol KMnO_4 , начинает увеличиваться, а время обесцвечивания раствора с концентрацией $[\text{KMnO}_4] = 3.8 \cdot 10^{-4}$ mol/l начинает расти более резко. Отсюда следует, что за время реакции успевает эффективно перемешиваться слой ~ 20 mm. Если тот же разряд проводить, когда оба электрода расположены над поверхностью жидкости или полностью погружены в раствор, то за время 20 min никаких заметных изменений окраски раствора не видно. При переходе разряда из импульсного режима в режим постоянного тлеющего разряда изменение цвета раствора за 20 min также не наблюдалось.

На рис. 3 представлена зависимость времени обесцвечивания растворов с толщиной слоя 10 и 20 mm при $V = +12.2$ kV, $I = 0.5$ mA от количества содержащегося в нем KMnO_4 . Видно, что время обесцвечивания остается постоянным при добавлении к 10 ml раствора, содержащего от $1.9 \cdot 10^{-6}$ до $\sim 2.3 \cdot 10^{-5}$ mol KMnO_4 , такого же количества воды, что свидетельствует об одинаковой эффективности перемешивания слоев раствора толщиной 10 и 20 mm за время реакции.

На рис. 4 представлена зависимость напряжения на зазоре и времени обесцвечивания $= 3.8 \cdot 10^{-4}$ mol/l раствора KMnO_4 объемом 10 ml (толщина слоя жидкости 10 mm) при положительной полярности напряжения на разрядном электроде и токе 0.5 mA от расстояния электрод–жидкость. Видно, что с ростом этого расстояния напряжение на зазоре увеличивается примерно в 2 раза и примерно во столько же раз уменьшается время обесцвечивания. Сравнивая этот результат с данными табл. 1, где приводятся результаты наблюдения обесцвечивания раствора при разных режимах разряда, можно утверждать, что реакция определяется выходом

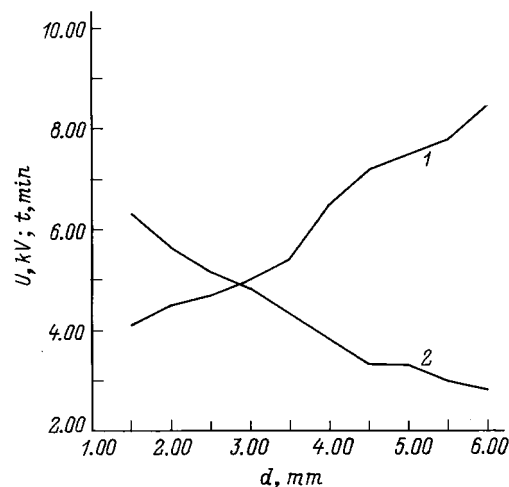


Рис. 4. Зависимость времени (t) обесцвечивания 10 ml $3.8 \cdot 10^{-4}$ mol/l раствора KMnO_4 (2) и напряжения (U) на зазоре (1) от расстояния d электрод–жидкость. Ток разряда 0.5 mA, на разрядном электроде плюс.

Таблица 1. Время обесцвечивания $1.9 \cdot 10^{-4}$ mol/l раствора KMnO_4 при разных режимах электрического разряда для положительной полярности напряжения на разрядном электроде

Характеристика разряда				Характеристика измерений	Выделившаяся энергия, J
Вид	I, m	V, kV	P, W		
Коронный	0.05	9.5	~ 0.5	За 30 h раствор немного посветлел	15 J
Искровой	0.5	8.5	~ 4.25	За 4 min раствор полностью обесцветился	0.28 J
Дуговой	5	2	~ 10	Через 20 min цвет пропал, хотя осадок в углах сосуда еще есть	3.33 J

частиц в электрическом поле газового промежутка и зависит от напряжения, приложенного к зазору, а не от мощности в разряде (при дуговом разряде, как видно из табл. 1, мощность в два раза больше, чем при искровом, однако время обесцвечивания существенно больше). Таким образом, в случае KMnO_4 существует оптимальное значение напряженности электрического поля и при повышении или уменьшении напряженности поля эффективность реакции падает.

Толщина слоя жидкости, в котором происходит эффективное перемешивание раствора под действием электрического поля, была определена экспериментально. Для наблюдения перемешивания раствора проводился эксперимент с обесцвечиванием объема жидкости 250 ml, толщиной слоя 80 mm, при положительной полярности напряжения на электроде, токе 0.5 mA и напряжении на зазоре 4.3 kV. За 12 min реакции обесцветился слой толщиной 10 mm, за 50 min — толщиной 20 mm. Весь раствор обесцветился за 4 h 10 min. При повышении напряжения время обесцвечивания верхнего слоя толщиной 10 mm сокращался, а время обесцвечивания всего объема практически не менялось. Отсюда видно, что в этих условиях (т.е. при большой поверхности жидкости) эффективно перемешивается верхний слой толщиной 10 mm.

Как упоминалось ранее, при попадании искры на поверхность жидкости в ней возникает импульс тока и распределение потенциала внутри жидкости зависит от ее проводимости. При увеличении проводимости потенциал внутри жидкости будет уменьшаться быстрее и перемешивание жидкости будет медленнее. Для иллюстрации этого утверждения был выполнен эксперимент с обесцвечиванием раствора объемом 20 ml с толщиной слоя 20 mm при искровом разряде, напряжении на зазоре 9.5 kV, токе 0.5 mA, содержащего $3.8 \cdot 10^{-6}$ mol/l KMnO_4 в дистиллированной и водопроводной воде. Сопротивление раствора составляло $\sim 100 \text{ k}\Omega$ для раствора в дистиллированной воде и $\sim 9 \text{ k}\Omega$ для раствора в водопроводной воде. Время полного обесцвечивания раствора в дистиллированной воде составляло 4 min, а в водопроводной — 17 min, т.е. при уменьшении сопротивления раствора время обесцвечивания увеличивалось.

2) Р а з л о ж е н и е ц и а н и с т о г о к а л и я. Исследовалось разложение раствора KCN с

концентрацией цианидов $[\text{CN}] = 40 \text{ mg/l}$, $\text{pH} = 9.5$ [19]. Реакцию проводили в том же сосуде, что и для раствора KMnO_4 . Для улавливания паров цианистоводородной кислоты в выходном потоке газа ставили поглотитель, содержащий 0.1 M раствор NaOH. По окончании реакции аргентометрическим методом определяли содержание цианидов в самом реакционном сосуде, через который пропусклся электрический разряд, и в поглотителе. За расход цианида при осуществлении реакции принималась разность исходного количества цианидов в первом и втором сосудах после реакции.

Реакцию разложения цианидов осуществляли в течение 1 h. Температура реакционного сосуда в течение реакции поддерживалась постоянной на уровне 20–21°C. Объем исходного раствора брали каждый раз одинаковым (20 ml). Реакцию проводили при отрицательной полярности напряжения на разрядном электроде для разных режимов электрического разряда (коронный, искровой, дуговой). Результаты эксперимента представлены в табл. 2. Воспроизводимость результатов при одном значении тока была не хуже 3%. Эти результаты свидетельствуют о том, что наибольшая степень разложения цианидов наблюдается при коронном разряде, когда ток и количество электронов, протекшее в цепи, минимальны. При искровом и дуговом разряде степень разложения существенно меньше, чем при коронном, причем изменение тока для одного вида разряда не приводит к изменению степени разложения цианидов. Таким образом, в случае цианистого калия наибольшая эффективность разложения наблюдается при максимально достижимой напряженности электрического поля.

Таблица 2. Доля неразложившихся цианидов после обработки раствора электрическим разрядом в течение 1 h при отрицательной полярности напряжения на разрядном электроде для разных областей разряда в промежутке электрод–жидкость

Вид разряда	I, mA	Доля оставшихся цианидов, %
Коронный	0.15	7.5
Искровой	0.5	60
	1	56
Дуговой	3	77
	5	75

При возрастании плотности тока разряда напряженность электрического поля падает из-за экранирования внешнего поля объемным зарядом. Влияние пространственного заряда на эффективность разложения цианида (зависимость от плотности тока) было показано в следующем эксперименте. Было взято 20 ml раствора KCN с концентрацией 30 ± 1 mg/l. Разложение цианидов осуществлялось в режиме искрового разряда при отрицательной полярности напряжения на разрядном электроде и среднем токе 0.5 mA. После обработки в течение 2 h остаточное содержание цианидов было 17 ± 1 mg/l. Затем емкость 7 (рис. 1) была увеличена до $0.025 \mu\text{F}$. При этом среднее значение тока не изменилось, но изменился характер разряда. Его частота повторения стала ~ 10 Hz. При сохранении среднего значения тока это означает, что импульсное значение тока увеличилось. Через 2 h обработки в таком режиме содержание цианидов стало 22 ± 1 mg/l. Отсюда видно, что при увеличении плотности тока разряда эффективность разложения цианидов уменьшилась, хотя энергия, выделяемая в искровом промежутке в единицу времени, осталась прежней.

Выводы

Показано, что при иницировании химических реакций в жидкости активными частицами, образующимися при электрическом разряде в газе, должны выполняться определенные условия: 1) концентрация генерируемых активных частиц должна быть связана с концентрацией примеси, растворенной в воде, с которой они будут взаимодействовать; 2) газовая полость над поверхностью жидкости должна иметь минимальную высоту; 3) электрический разряд должен быть импульсным; 4) толщина слоя жидкости, в которой могут иницироваться реакции, не превышает 20 mm.

Выполненные эксперименты свидетельствуют, что существуют оптимальные условия электрического разряда для осуществления конкретных реакций.

Список литературы

- [1] Андреев Д.Н. Органический синтез в электрических разрядах. Под ред. А.Д. Петрова. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1953. 334 с.
- [2] Клоповский К.С., Ковалев А.С., Лопачев Д.В. и др. // Физика плазмы. 1992. Т. 18. Вып. 12. С. 1606.
- [3] Басов Н.Г., Данилычев В.А., Пантелеев В.И. и др. // ДАН СССР. 1997. Т. 233. № 5. С. 839.
- [4] Верецагин И.П. Коронный разряд в аппаратах электронно-ионной технологии. М.: Энергоатомиздат, 1985. 160 с.
- [5] Акишев Ю.С., Дерюгин А.А., Кочетов И.В. и др. // Физика плазмы. 1994. Т. 20. № 6. С. 585.
- [6] Шведчиков А.П., Белоусова Э.В., Полякова А.В. и др. // Химия высоких энергий. 1992. Т. 26. № 4. С. 317.
- [7] Hickling A. // Modern Aspects of Electrochemistry. London: Butterworths, 1971. N 6. 329 p.
- [8] Павлов В.И. // ДАН СССР. 1947. Т. 55. С. 37.

- [9] Шведчиков А.П., Белоусова Э.В., Полякова А.В. и др. // Химия высоких энергий. 1993. Т. 27. № 1. С. 63.
- [10] Кожин В.Ф., Кожин И.В. // Озонирование воды. М.: Стройиздат, 1974. С. 21.
- [11] Hoigne J. // Process Technologies for Water Treatment / Ed. by S. Stucki. Plenum Publishing Corporation, 1988. P. 121.
- [12] Кулагин Ю.А., Шелепин Л.А., Ярыга В.Н. // Тр. ФИАН. 1994. Т. 218. С. 166.
- [13] Пискарев И.М., Севастьянов А.И. // Тез. докл. VI Междунар. фрумкинского симпозиума "Фундаментальные аспекты электрохимии". М.: МГУ, 1995. С. 138.
- [14] Пискарев И.М., Рылова А.Е., Севастьянов А.И. // Электрохимия. 1996. Т. 32. № 7. С. 895.
- [15] Пискарев И.М., Севастьянов А.И. // II Междунар. конгресс ЭКВАТЕК-96. М., 1996. С. 364.
- [16] Скорчелетти В.В. Теоретическая электрохимия. Л.: Государственное научно-техническое издательство химической литературы. 1959. 87. с.
- [17] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1992. 438 с.
- [18] Акишев Ю.С., Дерюгин А.А., Каральник И.В. и др. // Физика плазмы. 1994. Т. 20. № 6. С. 571.
- [19] Пискарев И.М., Рылова А.Е., Севастьянов А.И. Препринт № 94-13/335. М.: НИИЯФ МГУ, 1994.