

СИНТЕЗ ОЗОНА В РАЗРЯДЕ НА ПОВЕРХНОСТИ ГАММА-ОБЛУЧЕННОГО ПОЛИЭТИЛЕНА НИЗКОЙ ПЛОТНОСТИ

Ю.Г. Смирнова, А.В. Токарев

Предложен новый вариант барьерно-поверхностного разряда, где в качестве диэлектрического барьера используется термоусадочная трубка из гамма облученного полиэтилена низкой плотности.

Ключевые слова: озон; диэлектрический барьер; термоусадочная трубка, разряд.

Введение. В последние десятилетия интенсивно ведутся работы в направлении совершенствования озонаторного оборудования [1–5]. Созданы высокопроизводительные озонаторы на основе высокочастотных барьерного и поверхностного разрядов. Однако создание таких установок еще более обострило проблему ресурса диэлектрических барьеров озонаторных ка-

мер. Так как озон является одним из сильнейших окислителей, то в озонаторе происходит интенсивный износ его элементов. Как правило, первым из строя выходит диэлектрический барьер разрядной ячейки. Кроме воздействия озона, барьер испытывает разрушения, обусловленные как микроразрядами, так и непосредственно высокочастотным электрическим полем. Совместное

воздействие этих факторов приводит к пробое диэлектрического барьера и короткому замыканию разрядного промежутка. Вопрос состоит в том, насколько быстро произойдет разрушение барьера. Известно, что если разряд в озонаторе устойчиво однородный и параметры барьера (материал, его качество, геометрия и размеры барьера) подобраны правильно, то барьер практически будет работать неограниченно долго [6].

В большинстве работ констатируется только факт самого разрушения барьера. Отсутствие анализа причин приводит к очевидному пути решения данной проблемы: использованию новых диэлектрических материалов и возможности быстрой замены элементов с разрушенными барьерами. С учетом этого возникает необходимость совершенствования установок для синтеза озона путем использования новых материалов и конструктивных решений.

В работе представлен озонатор, в котором диэлектрический барьер выполнен из современного и высокотехнологичного материала – гамма облученного полиэтилена низкой плотности (ПНП), устойчивого к агрессивным средам различного вида.

ПНП представляет собой прочный, очень гибкий и слегка упругий термопласт, несколько более мягкий, легче формуемый и выдавливаемый, чем полиэтилен высокой плотности; полиэтилен низкой плотности находит широкое при-

менение в производстве покрытий, упаковочных материалов и изделий, изготавливаемых методом литьевого формования [7].

Изготавливаемая с использованием гамма-излучения из кабельных композиций ПНП термоусадочная трубка (ТУТ) является диэлектрическим барьером в предлагаемой плазмохимической ячейке. Основное свойство ТУТ – способность изменять свой диаметр, сжиматься (усаживаться) под воздействием высокой температуры (от 70 до 300°C, в зависимости от вида трубки). Во время усадки трубка плотно охватывает предмет или материал, на который происходит усадка, повторяя его контуры и обеспечивая механическую и электрическую защиту. Процесс усадки, как правило, происходит очень быстро, достаточно лишь нагреть трубку до нужной температуры.

Эксперимент. Представлены две конструкции разрядной ячейки, где диэлектрическим барьером является термоусадочная трубка из ПНП, принципиальное отличие которых – расположение разрядной зоны.

В первой конструкции (рис. 1а) синтез озона осуществляется на внешней стороне ТУТ 1 длиной 1 м диаметром 10 мм и толщиной стенки 1 мм. Усадка трубки производится на металлический электрод 2 диаметром 8 мм. Диаметр ТУТ подбирается таким образом, чтобы после усадки она плотно обжимала металлический электрод. На поверхность диэлектрика наматывается элек-

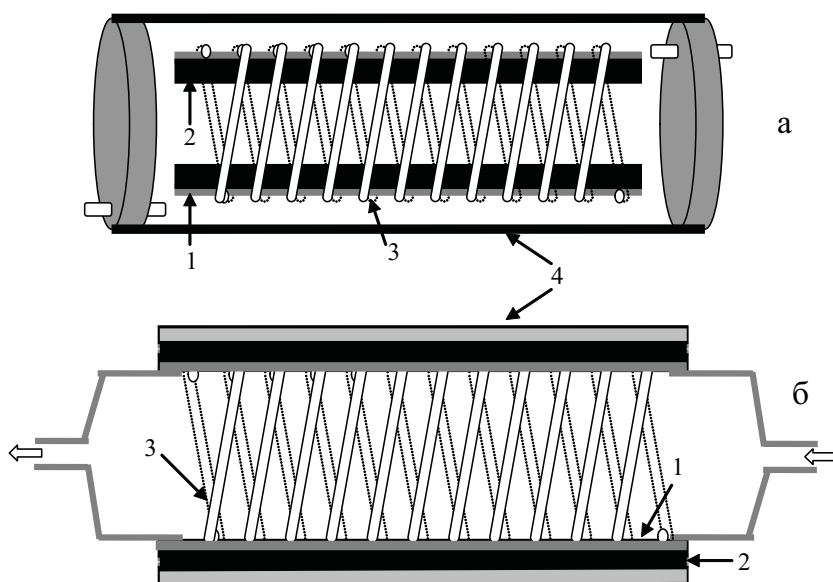


Рис. 1. Схемы разрядных узлов экспериментальной установки: а – первой конструкции, б – второй конструкции: 1 – диэлектрический барьер из полиэтилена низкой плотности, 2 – металлический электрод, 3 – спираль из нихрома (электрод), 4 – внешний кожух.

трод 3 в виде спирали из нихрома диаметром 0,8 мм, с шагом навивки 10 мм. Полученный разрядный контур помещается в стеклянный кожух 4, через который прокачивается плазмообразующий газ. При подаче на электроды переменного напряжения до 10 кВ, частотой 50 Гц, зажигается барьерно-поверхностный разряд.

Во второй конструкции (рис 1б), синтез озона осуществляется на внутренней поверхности трехслойного барьера 1 из ПНП. Длина ТУТ 1 м, толщина равна толщине барьера, как и для первого случая – 1 мм. Коронирующий электрод 2 в виде спирали из нихрома, диаметром 0,8 мм и шагом навивки 10 мм размещался без зазора на внутренней поверхности диэлектрического барьера. Второй электрод 3 из тонкой фольги, размещался на наружной части термоусаживаемой трубки. Рабочий газ прокачивался через полость трубки.

В качестве плазмообразующего газа использовался осушаемый до точки росы – 55°C кислород. Расход кислорода регулировался ротаметрами. Концентрация озона определялась на выходе при помощи озонметра (Медозон 254/3).

Питание разрядных ячеек осуществлялось от трансформатора ТГ-1020 в интервале напряжений 0–10 кВ. Мощность разряда определялась вольт-амперно. По расходу кислорода, концентрации озона и мощности разряда определялись энергетические показатели синтеза озона.

Результаты и обсуждение. Вольт-амперная характеристика разряда (рис. 2) близка к линейной зависимости на обеих модификациях разря-

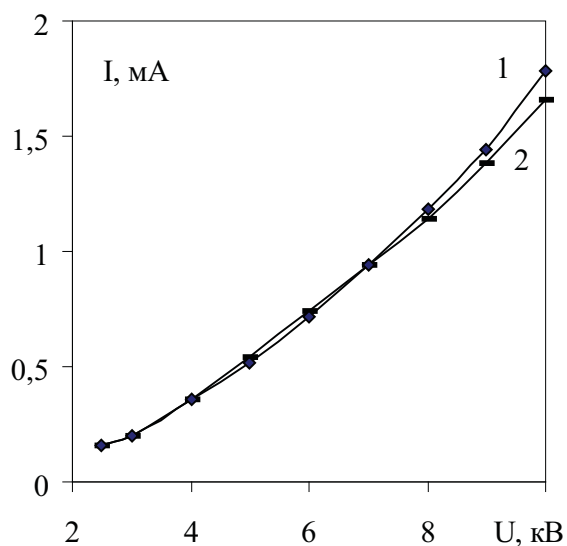


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика разряда: 1 – разряд внутри ПНП, 2 – разряд снаружи ПНП.

да. При этом значения тока не зависят от расхода плазмообразующего газа, хотя общее направление к уменьшению тока с увеличением скорости потока можно заметить.

Максимальное значение эффективного тока разряда составляет 1,78 мА при напряжении 10 кВ. Экстраполируя линейную зависимость до пересечения с осью абсцисс согласно [6] можно определить напряжения зажигания разряда U_z . Для разряда снаружи трубки U_z близко к значению 2,2 кВ, а для разряда на внутренней поверхности ТУТ U_z равно 2,3 кВ. Экспериментально зафиксированное напряжение зажигания для обоих случаев было одинаковым и составляет 2,2 кВ.

При низких напряжениях значения тока для разряда снаружи ТУТ совпадает с током разряда на внутренней поверхности трубки. С увеличением напряжения наблюдается расхождение значений. Ток разряда внутри трубки возрастает более быстро (рис. 2, кривая 1). Разница для токов при одинаковых прочих параметрах определяется концентрацией озона в разряде.

Зависимость концентрации озона от расхода плазмообразующего газа имеет характер, аналогичный результатам, полученным на других подобных конструкциях озонаторов [9, 10]. Концентрация озона уменьшается с увеличением расхода плазмообразующего газа.

Концентрация (рис. 3) и наработка (рис. 4) озона растет с напряжением, причем их значение в разряде снаружи ТУТ на 35% выше, чем для разряда внутри ТУТ. Разница в производительности озона, по-видимому, связана с конструктивными особенностями исполнения разрядной ячейки. Для оценки влияния конструктивных особенностей были исследованы напряженности электрических полей в том и другом варианте исполнения разрядной ячейки.

Напряженность электрического поля рассчитывалась по способу Максвелла [11]. Согласно Максвеллу, строятся электрические поля двух точечных зарядов, силовые линии которых выходят из центра по радиусам. Пересекаясь в пространстве, они образуют сетку четырехугольных ячеек, большая диагональ которых равна геометрической сумме напряженности полей. Соединяя соответствующие углы ячеек сетки, получают картину результирующего поля. В случае неоднородной диэлектрической среды, силовые линии переходят из одной диэлектрической среды – воздуха с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_1=1$, в другую – полиэтилен с $\epsilon_2=3,2$. Нормальная составляющая напряженности поля всегда уменьшается во столько раз, во сколько

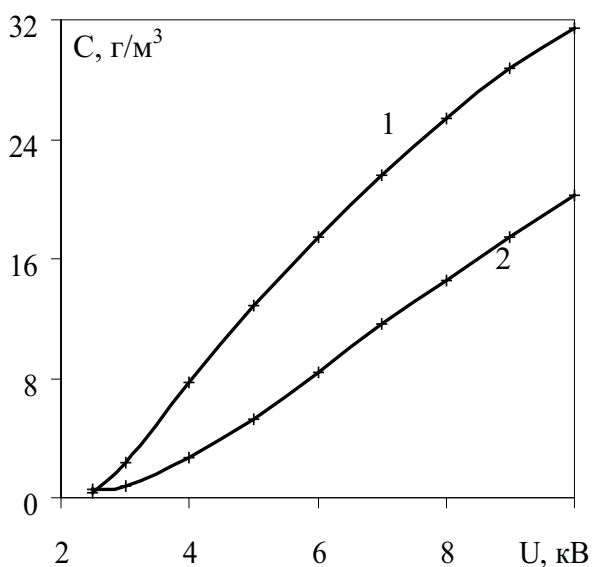


Рис. 3. Концентрация озона в разряде:
1 – снаружи ТУТ, 2 – внутри ТУТ.

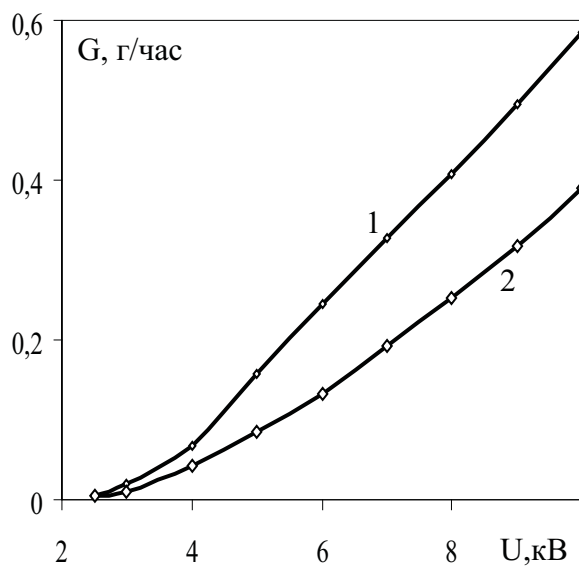


Рис. 4. Наробotka озона в разряде на ПНП
снаружи трубки – 1, внутри трубки – 2.

увеличивается диэлектрическая проницаемость среды. Вследствие этого изменяется длина силовых линий.

По этим силовым линиям строятся эквипотенциальные поверхности, где максимальным потенциалом условно принятым за 1, обладает эквипотенциальная поверхность точечного заряда. Если величина зарядов, создающих поле одинаковая, то на половине расстояния между зарядами будет проходить эквипотенциальная поверхность с нулевым потенциалом, которая заменяется плоскостью с тем же потенциалом.

Экспериментальная разрядная ячейка (рис. 1а) разбивается на большое количество элементарных областей, и в каждой такой области высокопотенциальный проволочный электрод можно представить как точечный заряд, лежащий на диэлектрической подложке, за которым находится проводящая плоскость – другой электрод.

В работе [12] приводится решение, полученное из уравнений электростатики, которое позволяет находить электрическое поле одиночного провода над плоскостью, вдоль прямой линии, соединяющей провод и плоскость. Прямая линия, соединяющая провод и плоскость, для которой уже имеется решение для нахождения напряженности поля, является не чем иным, как силовой линией, а исходя из того, что электрические силовые линии соответствуют путям, вдоль которых стал бы двигаться в электрическом поле точечный электрический заряд, можно сделать вывод

о равноправии всех возможных силовых линий и, следовательно, имеющееся решение можно использовать для расчета напряженности поля вдоль любой из силовых линий, в следующей форме:

$$E(s) = \frac{U}{s \cdot \ln(2 \cdot L / r_0)}$$

где U – напряжение; r_0 – радиус проволочного электрода 0,04 см; s – расстояние вдоль силовой линии от центра электрода до рассматриваемой точки; L – расстояние вдоль силовой линии от центра электрода до другого электрода.

Для разряда снаружи термоусадочной трубки напряженность поля представлена на рис. 5, 1. Для разряда внутри термоусадочной трубки, элементарная область, соответствующая рис. 1б, имеет несколько отличный характер от элементарной области рис. 1а. Расстояния от коронирующего электрода, лежащего на диэлектрическом барьере до диаметрально противоположной стенки барьера, за которой расположен другой электрод, сравнительно мало, и между электродами также возникает электрическое поле. Элементарную область разрядной ячейки можно разделить на две части, где первая будет полностью соответствовать элементарной области первой конструкции разряда. Вторая будет состоять из коронирующего электрода, неоднородного барьера (воздуха и ПНП) и второго электрода. Распределение напряженности электрического поля в этом случае определялось согласно принципу суперпозиции полей для системы коронирую-

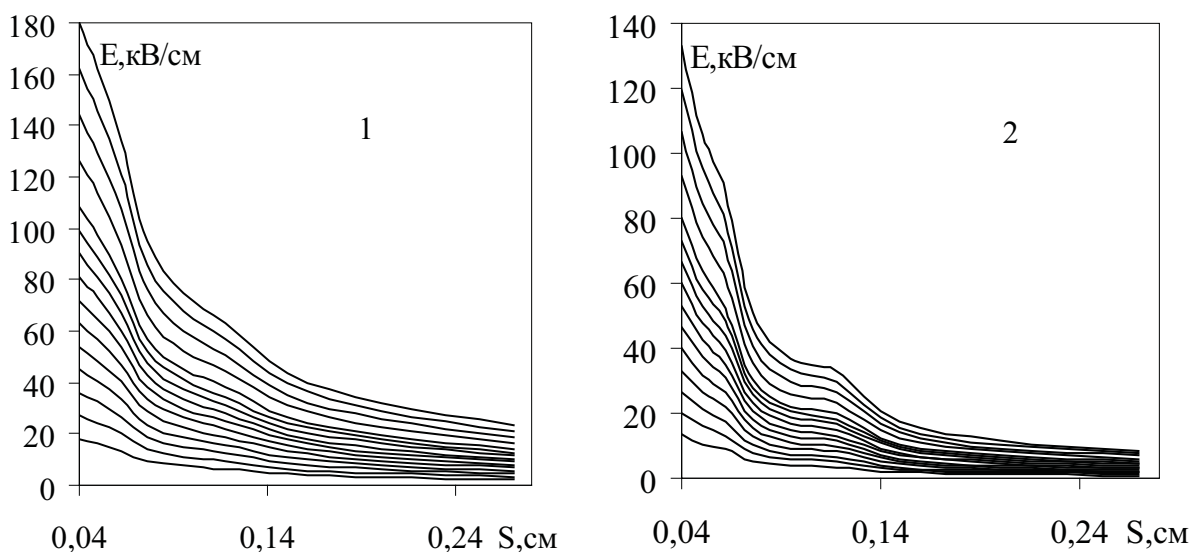


Рис. 5. Распределение напряженности электрического поля в барьерно-поверхностном разряде: 1 – снаружи ТУТ, 2 – внутри ТУТ.

щий электрод – барьер – другой электрод и коронирующий электрод – воздух – барьер – другой электрод (рис. 5, 2).

Как следует из графиков, напряженность поля для первой конструкции разрядной ячейки значительно выше напряженности электрического поля во второй. Количественная оценка результирующих полей показывает, что разница составляет около 25%.

Напряженность электрического поля влияет на развитие микроразрядов, в которых и происходит электросинтез озона. Это позволяет объяснить наблюдаемую картину. В первом варианте исполнения разрядной ячейки ослабления электрического поля не происходит и развитие микроразрядов ничем не ограничивается. Во втором варианте при малых напряжениях ослабление поля незначительно и доминирующую роль играет напряженность поля на поверхности диэлектрика, непосредственно соприкасающегося с коронирующим электродом (как и в первом случае). Количество токовых каналов в первой и второй конструкциях разрядной ячейки равны, что и дает эквивалентное в обоих случаях значение силы тока и сравнительно близкий результирующий выход концентрации озона. С увеличением напряжения силовые линии все более искажаются, напряженность поля на поверхности контактирующего диэлектрика ослабляется, что препятствует развитию микроразрядов. Вследствие этого для развития однотипных микроразрядов в случае разряда на внутренней поверхности ТУТ,

требуется большее напряжение. Поэтому при одинаковых напряжениях и геометрических параметрах разрядной камеры, концентрация и наработка озона в разрядной ячейке первого типа выше, чем для второго.

При технологическом использовании озона решающее значение имеет энергетический выход ($\text{гO}_3/\text{кВт}\cdot\text{ч}$ или $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{кгO}_3$) в том или ином способе его получения. Анализ литературных данных показывает, что на энергетический выход влияют как геометрические параметры раз-

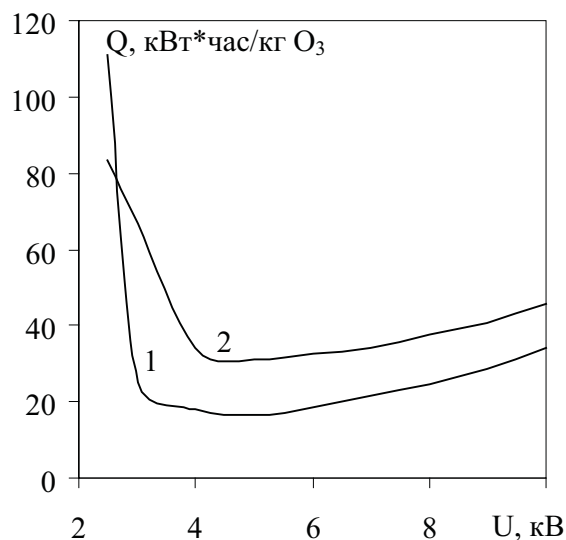


Рис. 6. Энергозатраты на синтез озона: 1 – разряд снаружи ТУТ, 2 – разряд внутри ТУТ.

ряда, так и конструктивные особенности разрядной камеры. Зависимости энергозатрат от напряжения для разряда на ПНП представлены на рис. 6. Минимум приходится на эффективное напряжение 4–5 кВ и составляет 20 кВт*ч/кгО₃ для первой конструкции разрядной ячейки и 35 кВт*ч/кгО₃ для второго варианта разрядной ячейки. Расход плазмообразующего газа на энергозатратах сказывается слабо, максимальный разброс при варьировании расхода от 0,2 л/мин до 1 л/мин составляет 13%. В целом энергозатраты входят в предел допустимых, и для данного типа диэлектрика являются оптимальными.

Выводы. Таким образом, озонаторная установка первой конструкции с барьером из полиэтилена низкой плотности, исполненного в виде термоусадочной трубки, позволяет получать высокие концентрации озона при низких токах и незначительных энергозатратах.

Учитывая низкую себестоимость материала диэлектрического барьера, простоту исполнения устройства и возможность быстрой замены поврежденных участков, предложенную конструкцию озонаторной ячейки, можно рекомендовать для дезинфекции общественных и складских помещений, стерилизации оборудования и др.

Литература

1. Анализ состояния производства озонаторного оборудования // Информационный центр Озон. – 1997. – №4.
2. Wagner H.-E., Brandenburg R., Kozlov K.V., Sonnenfeld A., Michel P., Behnke J.F. The barrier discharge: basic properties and applications to surface treatment // *Vacuum*. – 2003. – V. 71. – P. 417–436.
3. Боромбаев М.К., Шаршембиев К., Энгельшт В.С. Барьерно-поверхностный разряд на двухжильном проводе // *Вестник КРСУ*. – 2003. – Т. 3. – № 2. – С. 53–58.
4. Кузьмин Г.П., Минаев И.М., Рухадзе А.А. Обтекание вязким потоком газа плазменного листа, образованного скользящим разрядом // *ТВТ*. – 2002. – Т. 40. – №3. – С. 515–524.
5. Нуднова М.М., Красночуб А.В., Стариковский А.Ю. Characteristics of atmospheric pressure glow discharge with liquid electrodes // Сб. трудов 4-го Междун. сим. по теор. и пр. плазмохимии / Ивановский гос. хим.-технол. университет. – Иваново, 2005. – Т. 2. – С. 151–156.
6. Самойлович В.Г., Гибалов В.И., Козлов К.В. Физическая химия барьерного разряда. – М.: МГУ, 1989. – 176 с.
7. <http://www.protonrf.ru/biblio/thermo.htm>.
8. Филиппов Ю.В., Вобликова В.А., Пантелеев В.И. Электросинтез озона. – М.: МГУ, 1987. – 236 с.
9. Токарев А.В., Юданов В.А. и др. Барьерно-поверхностный разряд с плазменным индукционным электродом // *Вестник КРСУ*. – 2003. – Т. 3. – №5. – С. 23–28.
10. Смирнова Ю.Г. Озонатор на основе барьерно-поверхностного разряда в диэлектрической трубке с металлической спиралью // *Озон и другие экологически чистые окислители. Наука и технологии: Матер. 1-й всерос. конф.* – М.: Книжный дом университет, 2005. – С. 139.
11. Смирнова Ю.Г., Энгельшт В.С. Определение параметров барьерно-поверхностного разряда с помощью эвристической модели // *Вестник КНУ*. – 2006. – №3.
12. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука. 1987. – 510 с.