

БАРЬЕРНО-ПОВЕРХНОСТНЫЙ РАЗРЯД В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТРУБКЕ С МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СПИРАЛЬЮ

Проведено визуальное наблюдение за разрядом. Исследованы вольтамперные и вольткулоновские характеристики барьерно-поверхностного разряда в диэлектрической трубке с металлической спиралью. Определена активная мощность, напряжение горения и эффективная емкость озонатора.

Введение

Изучению барьерного разряда уделяется большое внимание. Данный интерес главным образом связан с эффективностью его применения в разных сферах деятельности [1, 2]. В частности, барьерный разряд используется для реализации устройств, для синтеза озона – озонаторов. Озонаторы, основанные на других типах разрядов, уступают по производительности конструкциям на барьерном разряде. Эффективность производства озона может быть повышена путем одновременного генерирования двух типов разряда [3, 4]. Озон сильный окислитель и безопасный реагент, так как озон представляет собой трехатомную молекулу кислорода. При применении озона в окислительных процессах его избыток распадается на кислород, который не является вредным элементом для окружающей среды [2]. Озон находит широкое применение в сельском хозяйстве, медицине, промышленности. Изучение процессов происходящих в барьерном разряде позволяет говорить об эффективности того или иного озонатора. Озонаторы отличаются способами реализации барьерного разряда в них. Существует большое количество вариантов исполнения барьерного разряда, однако принцип классического барьерного разряда сохраняется везде [1, 3, 4]. Разряд возникает между металлическими электродами и диэлектриком, установленным между ними в газовом зазоре. При подаче напряжения на поверхности электрода проявляются микроразряды, число которых растет с ростом напряжения. Каждый микроразряд собирает ток с некоторой поверхности диэлектрика. Время жизни отдельного микроразряда составляет $\tau=10^{-6}$ с. Барьерный разряд характеризуется высокой энергией электронов 4-5 эВ и низкой температурой газа $T=500$ К.

В представленной работе описывается барьерно-поверхностный разряд в диэлектрической трубке с металлической спиралью (БПР в Д.Т. с М.С.). Барьерно-поверхностный разряд (БПР) отличается от классического барьерного динамической емкостью, обусловленной покрытием диэлектрика плазмой разряда. В БПР существует свободное пространство газа, где озон, однажды образовавшийся, может накапливаться, не опасаясь того, что слой его может быть разрушен разрядом [5]. Озонатор на основе БПР в Д.Т. с М.С. был запатентован В.С. Энгельштом в 1985 [6].

1. Экспериментальная установка

Для изучения барьерно-поверхностного разряда в диэлектрической трубке с металлической спиралью была собрана установка (рис. 1).

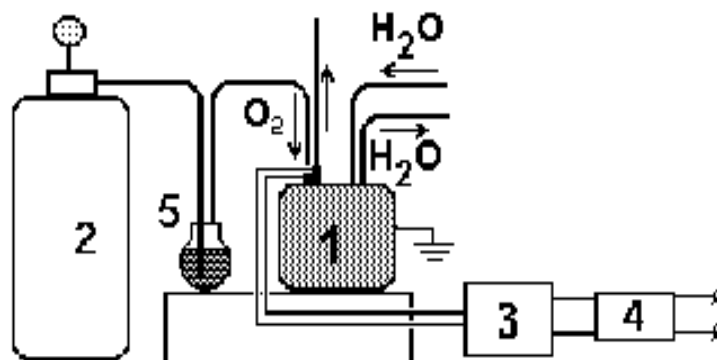


Рис. 1. Установка для изучения барьерно-поверхностного разряда в диэлектрической трубке с металлической спиралью.

1 - Озонирующее устройство, 2 - кислородный баллон,
3 - газосветный трансформатор ТГ-1020,
4 - лабораторный автотрансформатор, 5 - сосуд с силикагелем.

Озонатор представляет собой диэлектрическую трубку длиной 7 метров, внешним диаметром 15 мм, внутренний диаметр 10 мм (рис. 2), через полость, которой транспортируется кислород, предварительно осушаемый при прохождении через силикагель. Расход газа регулируется при помощи манометров кислородного баллона. Диэлектрическая трубка помещается в плотно закрывающуюся металлическую ёмкость объемом 20 литров. Ёмкость заполняется проточной водой и заземляется. Подача и отток воды происходит через трубки, закрепленные на крышке сосуда. Температура воды не должна быть выше 20°C, так как она охлаждает диэлектрическую трубку, в которой при возникновении разряда возникает высокая температура способная разрушить нарабатываемый озон. Внутри трубки, отстоя от ее стенок на 1 мм, помещается металлическая спираль из вольфрама диаметром 800 мкм, шагом спирали 1 см, состоящая из двух одинаковых частей. Расстояние между спиралью и трубкой не должно быть большим, что обеспечивает реализацию барьерного разряда.

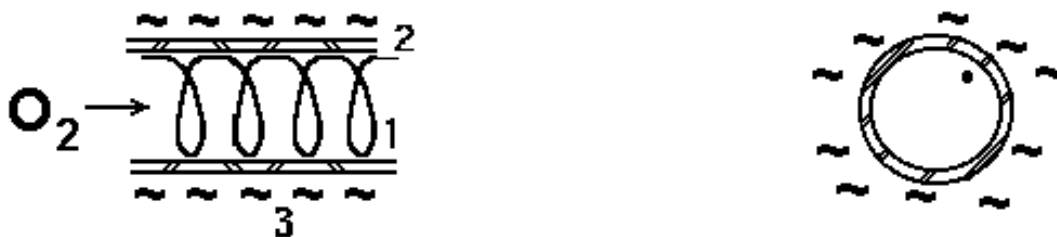


Рис. 2. Продольный и поперечный разрез озонатора.

1- металлическая спираль, 2 - диэлектрическая трубка, 3 - вода.

Предложенное размещение электродов ведет к тому, что существенно увеличивается площадь контакта между электродами и обеспечивается равномерность и сплошность разряда по всему внутреннему объему трубы. Поток газа, транспортируемый через полость трубки увлекает за собой озон, удаляя его из трубки.

2. Визуальное наблюдение за эволюцией разряда

Для визуального наблюдения за БПР в Д.Т. с М.С. был использован озонатор меньших размеров. Диэлектрическая трубка длиной 0,25 м, помещалась в стеклянный сосуд емкостью 1 л, заполненный непроточной водой. Один из электродов опускался в сосуд с водой, другой подводился к металлической спирали с шагом 1 см, помещенной в диэлектрическую трубку, продуваемую воздухом или кислородом. Воздух прокачивается

микрокомпрессором АЭН-4 (220 В, 50 Гц, 3 Вт). Наблюдения проводились в темном помещении.

На воздухе разряд зажигается при напряжении 1,8 кВ. Разряд наблюдается в виде слабого, невыраженного свечения белого оттенка. При дневном освещении разряда не видно. Звук, характерный для барьерного разряда здесь фиксируется в виде слабых щелчков. С увеличением напряжения белое свечение становится плотнее, насыщеннее, плазма окутывает спираль. При 2,5 кВ ощущается запах озона, свечение приобретает голубоватый оттенок (рис. 3а). При увеличении напряжения до 3 кВ свечение имеет четко выраженные контуры, окаймляя спираль, на которой выделяются яркие точки. На поверхности трубки начинает появляться поверхностный (скользящий) разряд (рис. 3б). При 3,5 кВ плазма частично заполняет полость трубки и на фоне ее видны яркие волнообразные щупальцы – стримеры. При 4 кВ трубка превращается в светящийся белый канал, четкость светящейся спирали размывается. При дальнейшем увеличении напряжения видно, что спираль светится дискретно, фиолетовыми точками, с размытыми хвостами (рис. 3в). Присутствует резкий запах озона и слышится сильное треск-жужжание. Размеры стримеров увеличиваются. С. Масуда, наблюдая БПР [6], выделил в стримере три зоны. Центральная часть стримера белого цвета, неизменная в своих размерах, по цвету и интенсивности при различной газовой среде. Следующая часть менее яркая, более плотная, намного длиннее, чем предыдущая. Цвет этих волокон намного голубее в кислороде, чем в воздухе или в азоте. Еще менее яркую часть представляет собой участок диффузии, не имеющий определенной формы или какой-либо видимой структуры, в воздухе или азоте проявляется пурпурно-лиловым цветом.

При напряжении больше 4,5 кВ спираль приобретает сиреневый цвет. При достижении 7,5 кВ сиреневое свечение появляется на поверхности трубки. На фоне ее яркими фиолетовыми точками светится спираль, видно четкое разделение внутренней полости трубки и ее стенок. При 9 кВ спираль как бы растворяется в сиреновом свечении и возникает иллюзия ее утолщения (рис. 3г). При напряжении 10 кВ сиреневое свечение становится очень интенсивным и плотным, спираль растворяется в нем, звук перерастает в монотонный треск. Трубка превращается в единый светящийся канал.

Барьерный разряд на кислороде имеет свои особенности. Разряд становится заметен при напряжении 2 кВ, характеризуется слабым белым свечением, с увеличением напряжения белое свечение разрастается и заполняет всю полость трубки, визуально дискретных точек не наблюдается, свечение однородно. При напряжении 10 кВ свечение заполняет всю полость трубки, четко выделяются стенки трубки. Звук разряда аналогичен звуку разряда на воздухе.

Сопоставляя полученные данные, следует, что цвет свечения зависит от состава газа. Как видно на воздухе, первым появляется белое свечение, которое соответствует свечению кислорода, так как энергия возбуждения у атомов кислорода меньше, чем у других элементов. Затем появляется сиреневый оттенок, принадлежащий азоту. Это объясняется тем, что молекулы азота достигают возбуждения и светятся в спектре видимой области.

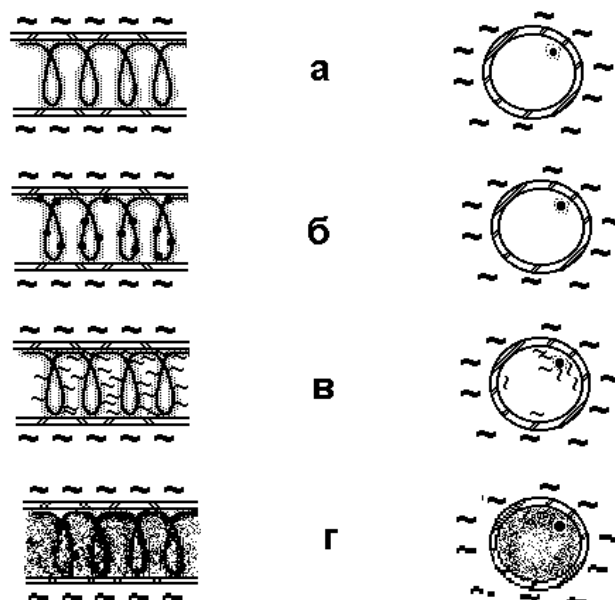


Рис 3. Эволюция барьерно–поверхностного разряда в диэлектрической трубке с металлической спиралью при различных значениях напряжениях а) $U = 2,5 \text{ кВ}$, б) $U = 3 \text{ кВ}$, в) $U = 5 \text{ кВ}$, г) $U = 9 \text{ кВ}$.

3. Электрические характеристики барьерного разряда в диэлектрической трубке с металлической спиралью. Методика измерения

3.1. Схема измерения. Регистрация осциллограмм

Измерение электрических характеристик барьерного разряда в диэлектрической трубке с металлической спиралью проводились по схеме на рис. 4.

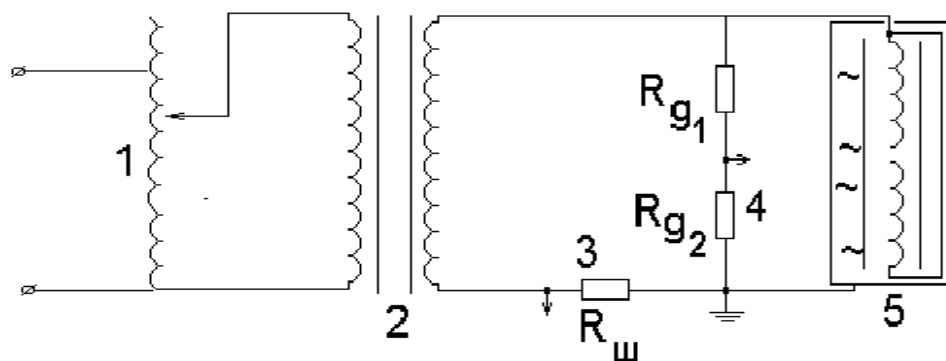


Рис. 4. Электрическая схема регистрации осциллограмм.

1- Лабораторный автотрансформатор, 2 - высоковольтный трансформатор, 3 - сопротивление шунта, 4 - делитель напряжения, 5 - озонатор.

Другие рассматриваемые схемы давали неадекватные результаты и не удовлетворяли электрическим требованиям озонатора. С повышающего трансформатора (см. рис.1) на концы спирали озонатора подается напряжение 10 кВ, таким образом, на каждую часть спирали приходится по 5 кВ (рис. 5а). Следовательно, электрическая схема измерения должна учитывать это обстоятельство. В используемой схеме была поставлена перемычка, которая позволила сохранить напряжение подаваемое на спирали 5 кВ (рис. 5 б).

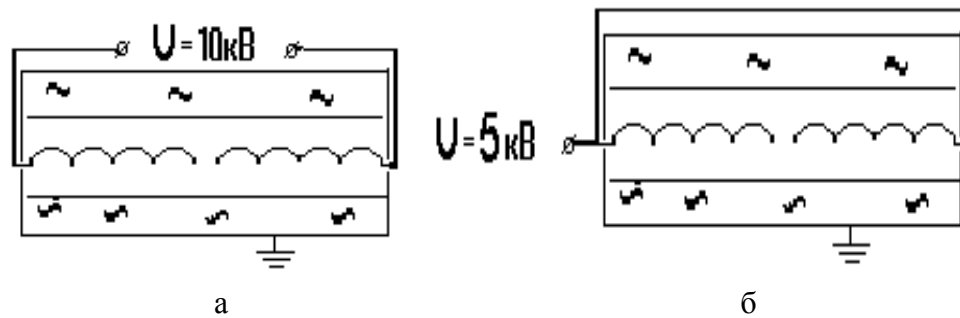


Рис. 5. Распределение напряжения на озонаторе:

а) при обычной работе озонатора, б) при снятии электрических характеристик.

Осциллограммы снимались с экрана двухлучевого осциллографа С1-83, входное сопротивление которого 1 МОм, а емкость 40 пФ. Для регистрации кривых тока $I(t)$ в схеме используется шунт сопротивлением 480 Ом. Напряжения, используемые для модуляции барьерного разряда порядка 10 кВ, для регистрации кривых напряжения $U(t)$ на осциллографе, максимум которого на входе составляет 100 В, используется делитель, состоящий из двух последовательно соединенных сопротивлений R_{g1} и R_{g2} . Коэффициент делителя равен 400. Используемые сопротивления должны быть больше сопротивления разряда. Напряжение на осциллографе снималось с активного сопротивления R_{g2} .

Осциллографирование тока и напряжения проводилось при различных входных напряжениях от 500 В до 5 кВ, при стандартной частоте 50 Гц, что соответствует полупериоду колебаний 0,01 с.

На оси абсцисс отложены интервалы времени Δt , по оси ординат мгновенные значения тока и напряжения. Разряд при приложении знакопеременного напряжения возникает дважды в период, причем его появление связано с достижением некоторого определенного значения питающего напряжения, а погасание соответствует моменту, когда питающее напряжение проходит через экстремум [2]. Из осциллограмм видно, что кривые тока отстают от кривых напряжения на интервал времени, равный полупериоду, что соответствует, в основном, емкостной нагрузке. Осциллограммы тока $I(t)$ и напряжения $U(t)$ имеют правильную синусоидальную форму при малых значениях напряжения (рис. 6а). После 2 кВ у кривых тока появляются составляющие высокочастотного тока. Кривые напряжения искажаются (рис. 5б). По осциллограммам тока и напряжения были определены мгновенные значения тока и напряжения в соответствии с формулам:

$$I(t) = U_{осц}(t) / R_{ш},$$

где $U_{осц}(t)$ - напряжение, регистрируемое осциллографом на шунте;

$$U(t) = (R_{\partial 1} + R_{\partial 1} / R_{\partial 2}) \cdot U_{г2осц},$$

где $U_{г2осц}$ - напряжение, регистрируемое осциллографом $R_{\partial 2}$

Из осциллограмм тока и напряжения определяются следующие величины: средний ток

$$I_{cp} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} |I(t)| dt,$$

полная мощность

$$N = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} |I(t)U(t)| dt,$$

активная мощность

$$W = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} I(t)U(t)dt,$$

реактивная мощность

$$N_p = \sqrt{N^2 - W^2}.$$

Эффективная емкость озонатора определяется из реактивной мощности. Все интегралы вычисляли по правилу прямоугольников, например

$$I_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{25} |I_i|, \quad C = I_{cp}^2 / 2\pi\nu N_p.$$

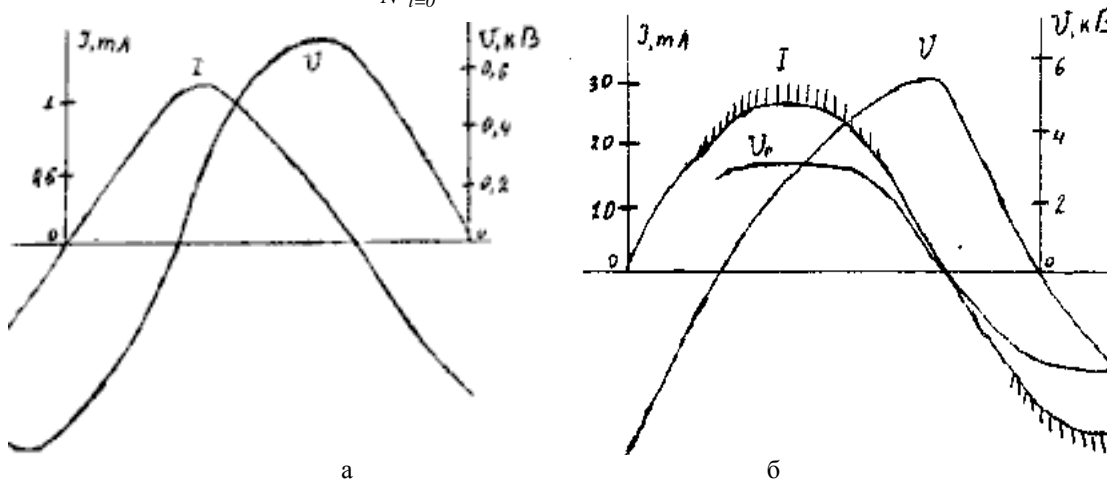


Рис. 6. Осциллограммы тока и напряжения а) 500 В, б) 5 кВ.

3.2. Регистрация и обработка ВКХ

Регистрация вольткулоновской характеристики барьерного разряда в диэлектрической трубке с металлической спиралью производилось по схеме аналогичной схеме 1. Шунт заменялся измерительным конденсатором емкостью 1 мкФ. Конденсатор накапливает заряд равный тому, который переносится через озонатор. Вольткулоновская характеристика имеет вид циклограмм $q(U)$ (рис. 7), где на вертикально отклоняющие пластины осциллографа подается напряжение пропорциональное величине заряда $q(t)$, а горизонтально отклоняющие пластины фиксируют напряжение $U(t)$. При высоких напряжениях циклограммы действительно похожи на вольткулоновскую характеристику классического барьерного разряда – параллелограмм, из-за наличия газового зазора, но существенно отличается от циклограмм БПР на двухжильном проводе [1, 4]. При низких напряжениях циклограмма больше похожа на вытянутый овал (рис. 7 а, б). Параллельность боковых сторон параллелограмма свидетельствует о постоянстве напряжения на разрядном промежутке озонатора во время существования разряда [7].

Циклограмма соответствует одному периоду питающего напряжения. По оси абсцисс отложено напряжение. Пик напряжения соответствует максимуму циклограммы. С учетом этого определяется цена деления и строится шкала напряжений. Заряд вычисляется из показаний осциллографа

$$q = U_{изм} * C,$$

где $U_{изм}$ – напряжение, регистрируемое осциллографом на конденсаторе, C емкость конденсатора.

Заряд и напряжение связаны между собой линейно в координатах, их зависимость представляет фигуру, площадь которой численно равна величине энергии выделяемой разрядом за период приложенного напряжения. Поэтому активная мощность W определялась по площади циклограмм по формуле:

Также из ВКХ определялось напряжение горения U_2 . Согласно [4] отрезок, отсекаемый средней линией циклограммы $3/4T - 1/4T$ и ее образующей вдоль $U(t)$ при фиксированном значении q , есть напряжение горения на разряде. На рис 6в показаны два значения $U_2(t')$ и $U_2(t'')$ в моменты времени t' и t'' . Точками на циклограмме

$$W = \frac{1}{T} \int_0^t U(t)I(t)dt = \nu \oint U(q)dq$$

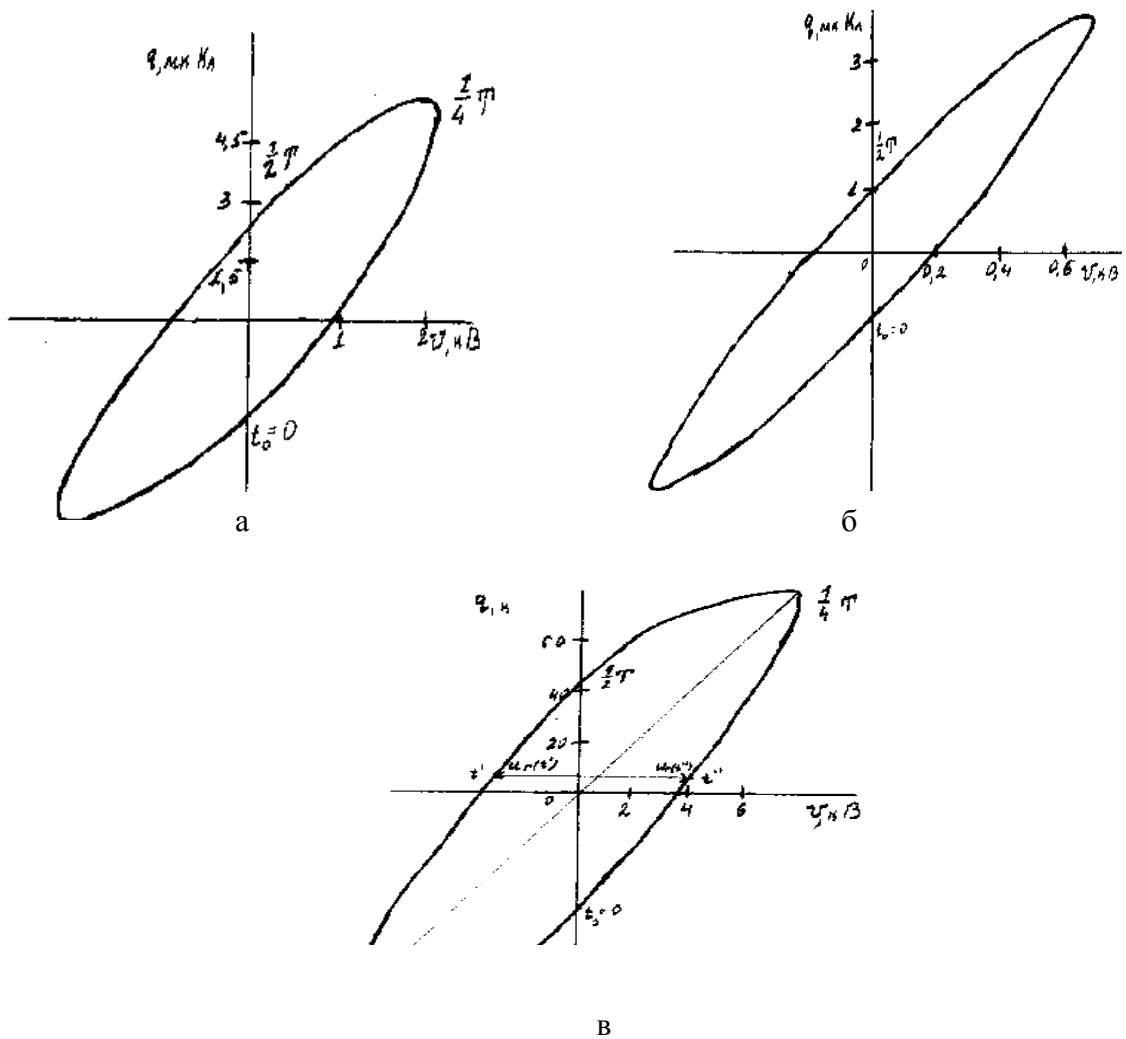
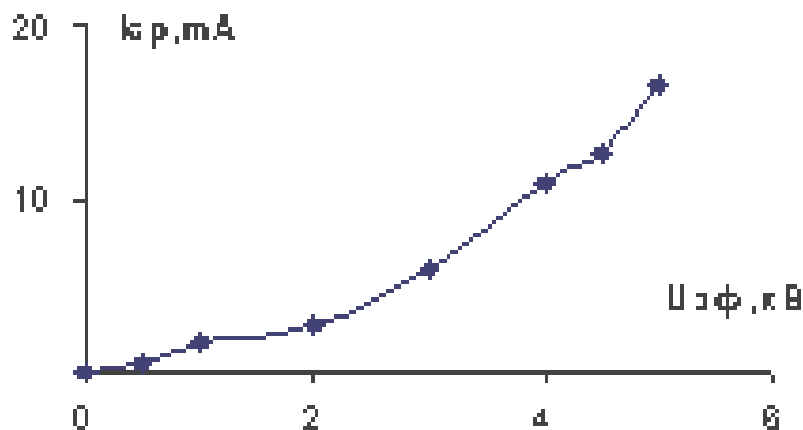


Рис. 7. Циклограммы БПР в диэлектрической трубке с металлической спиралью внутри при $U_{эф}$ а) 500 В, б) 2 кВ, в) 5 кВ.

отмечены моменты времени периода, полученные из соответствия напряжения питания на циклограмме и осциллограмме. Зависимость $U_{г}(t)$ при $U_{эф}=5$ кВ приведена на рис. 8б. Из рисунка видно, что напряжение горения синхронно меняется с током разряда, что объясняется наличием активной нагрузки.

4. Результаты измерения

На рис. 8 приведен график зависимости среднего тока разряда от напряжения. Ток плавно растет с увеличением напряжения. В классическом барьерном разряде ток имеет вид двух пересекающихся кривых [8]. Наклон кривых определяется емкостью барьеров. Плавный ход кривой в нашем случае объясняется изменением эффективной емкости, которая растет с ростом напряжения, так как плазма постепенно покрывает всю



поверхность диэлектрика (рис. 9).

Рис. 8. Статическая вольт-амперная характеристика разряда..

Активная мощность, определенная из циклограмм согласуется с активной мощностью, вычисленной по осциллограммам (рис. 10). Зависимости активной, реактивной, полной мощности озонатора имеют нелинейный характер. При малых напряжениях мощность почти не изменяется, при достижении напряжения 3 кВ мощность озонатора плавно начинает возрастать, из визуального наблюдения было установлено, что при этом напряжении разряд приобретает четкость и заполняет трубку.

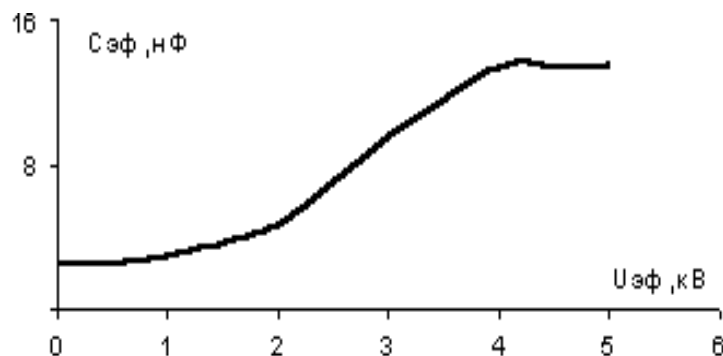


Рис. 9. Зависимость эффективной емкости озонатора от эффективного напряжения.

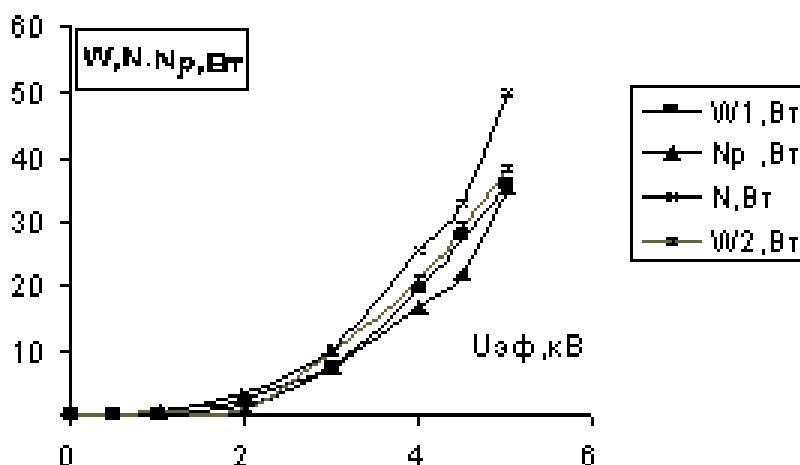


Рис. 10. Зависимости полной, активной, реактивной мощности разряда от напряжения. $W1$ - активная мощность, вычисленная по осциллограммам, $W2$ - активная мощность, вычисленная по циклограммам, N - полная мощность, Nr - реактивная мощность.

Увеличивается число микрозарядов, увеличивается активная мощность, которая характеризует непосредственно сам разряд.

На рис. 11 представлена зависимость максимального напряжения горения $Uг$ от $Uэф$. Напряжение горения резко возрастает около 2 кВ, что в визуальных наблюдениях соответствует частичному заполнению полости трубки разрядом. При 4,5 кВ кривая становится положе, значительного роста больше не наблюдается, плазма заполняет все пространство.

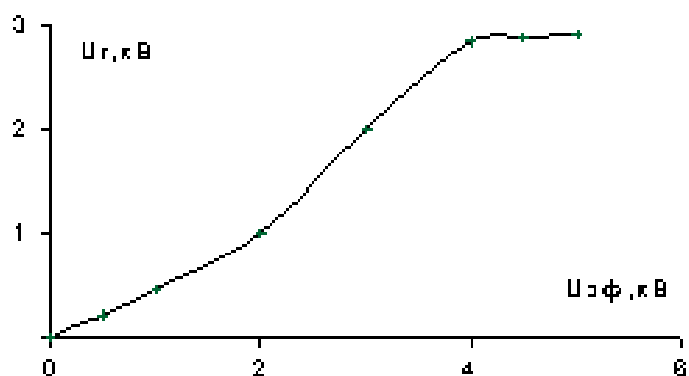


Рис. 11. Зависимость максимального напряжения горения от эффективного напряжения.

Выводы

Визуальное наблюдение показало, что плазма разряда не только покрывает поверхность диэлектрической трубки, но и заполняет объем около поверхности.

Цвет свечения разряда зависит от рода продуваемого газа и от напряжения разряда.

Осциллограммы тока и напряжения при малых значениях напряжения имеют правильную синусоидальную форму, при его увеличении искажаются из-за наличия активно-емкостного сопротивления в разряде.

Эффективная емкость разряда растет с ростом напряжения, но при определенном его значении достигает насыщения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Самойлович В.Г., Гибалов В.И., Козлов К.В. / Физическая химия барьерного разряда.- М.:МГУ, 1989. – 176 с.
2. Крапивина С.А./ Плазмохимические технологические процессы. – Л.: Химия, 1982. –248 с.
3. Токарев А.В. , Юданов В.А. и др. /Барьерно-поверхностный разряд с плазменным индукционным электродом. //Вестник КРСУ, Бишкек. 2003. Том 3. №5.- С. 23-28.
4. Боромбаев М.К., Шаршембиев К., Энгельшт В.С. /Барьерно-поверхностный разряд на двухжильном проводе. // Вестник КРСУ, Бишкек. 2003. Том 2. № 2. – С. 53-58.
5. Masuda S, Kiss E/ On streamer discharges in ceramic based ozoniser using high frequency surface discharge/ Electrostatiks/87.- Oxford.-8-10 April, 1987.- P.243-248.
6. Энгельшт В.С., Ларькина Л.Т./ Озонатор. Предпатент Кыргызской Республики № 39 от 28 сентября 1994, Бюл. № 1, 1996.
7. Филиппов Ю.В., Емельянов Ю.М. /Теория динамических характеристик озонаторов. // Физическая химия. Том 31, вып.7, 1957., - С.1628-1635.
8. Филиппов Ю.В., Емельянов Ю.М. /Электрическая теория озонаторов. Статические вольтамперные характеристики озонаторов. //Физическая химия.31, № 4., 1957. - С. 896-903.

Автор выражает благодарность В.С. Энгельшту за предложенную тему, ценные советы, а также М.К. Боромбаеву за полезные обсуждения.