

## ПРИМЕНЕНИЕ БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА В ПЛАЗМЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

*Приведены результаты исследования, разработки и применения озонаторов в лаборатории «Физика и техника плазмы» при Иссык-Кульском государственном университете им. К.Тыныстановы.*

### **Введение**

Барьерным называется разряд в газе атмосферного давления между электродами разделенными диэлектриком. Барьерный разряд (БР) возникает при подаче высокого переменного напряжения. Он состоит из отдельных кратковременных искорок, температура электронов в искрах достигает 30000К, температура газа низкая, комнатная ~300 К [1]. Под действием плазмы в искрах происходит диссоциация молекул, в результате, может образовываться озон из кислорода воздуха или чистого кислорода. БР известен уже давно. Уже в 1895 г. были созданы промышленные установки для получения озона и обеззараживания питьевой воды. С тех пор такие установки используются во многих передовых странах мира. Это основное назначение озонаторов на основе БР [2]. Озон находит применение в обеззараживании сточных вод, воздуха в помещениях, больницах, фруктовых хранилищах, используется при получении физиологически активных жидкостей и др. [2,3].

Несмотря на большую историю развития озонаторов с БР, есть еще много вопросов, которые подлежат исследованию. Наряду с известным классическим БР, в настоящее время разрабатываются и другие виды БР с целью сделать их более простыми по изготовлению, с меньшими затратами энергии для получения озона и для использования БР в других приложениях кроме получения озона [3].

В ИГУ в 1999 г. при физико-техническом факультете была организована лаборатория «Физика и техника плазмы». Основным направлением работы этой лаборатории, под руководством профессора В. С. Энгельшта, является исследование классического и других видов БР, разработка, конструирование экспериментальных установок. Кроме того проводятся изучение электрических характеристик, наработка озона, воздействия на твердый монолитный материал, обработка жидкостей. Эти работы проводятся не только в научном плане, но и в прикладном. Разработанные озонаторы и другие устройства предназначены для использования в народном хозяйстве Иссык-Кульской области, о чем будет сказано ниже. Работы, проводимые в лаборатории, объединяются тем, что все они связаны с изучением различных видов барьерных разрядов, близких по своим физическим свойствам и характеристикам. Кроме того, развиваются методы исследования, которые также являются общими для разных видов изучаемых разрядов, в основном это осциллографирование электрических характеристик, электрических параметров БР [4,5].

### **1. Объекты исследования**

#### **1.1 . Классический БР**

Для получения этого разряда использовалось устройство [2], в котором оба плоских электрода покрыты диэлектриками (рис.1). Расстояние между электродами может ступенчато изменяться на 3-6-10 мм. Устройство предназначено для исследования БР в смеси фреона с кислородом. Такая рабочая смесь представляет интерес для изучения воздействия БР на монолитный материал, в частности, монокристаллического кремния. Под действием плазмы фреон разлагается на элементарные компоненты F и Cl, которые взаимодействуя с поверхностью пластины Si, производят травление (модифицируют поверхность).

Особенность такого разряда смеси фреона с кислородом заключается в том, что для его питания и для его осуществления требуется высокое напряжение [4].

Это связано с тем, что F и Cl при разложении фреона являются компонентами с большой электроотрицательностью.

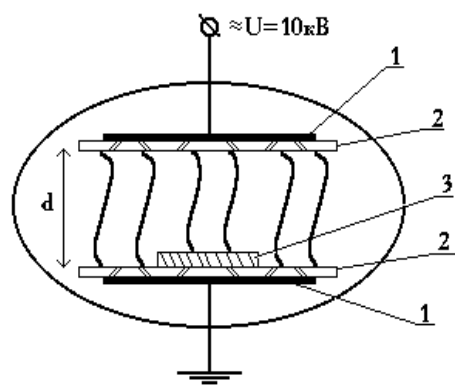


Рис. 1. Принципиальная схема классического БР. 1 - металлические электроды, 2 - диэлектрики, 3 - кремниевая пластина, d - расстояние между электродами.

Они захватывают электроны, которые вырабатываются в разряде и гасят разряд. Для того, чтобы поддерживать разряд, требуется большое напряжение. Поэтому данная установка при работе использует напряжение до 30 кВ. Источник питания для этой установки предназначен для питания плазмохимического реактора (ПХР) высоковольтным напряжением от 1 кВ до 35 кВ, с частотой 50 Гц и с максимальным допустимым током до 30 мА. Он содержит в себе (рис. 2) автотрансформатор РНО-250-50 (0-250В), высоковольтный трансформатор 3 НОМ-35-65-У1 (до 35кВ), ПХР контрольно-измерительные и защитные приборы. Сама разрядная камера ПХР представлена рис. 3. Испытание этого реактора и установки в целом показали, что удается работать при напряжении до 35 кВ без разрушения диэлектрика [4].

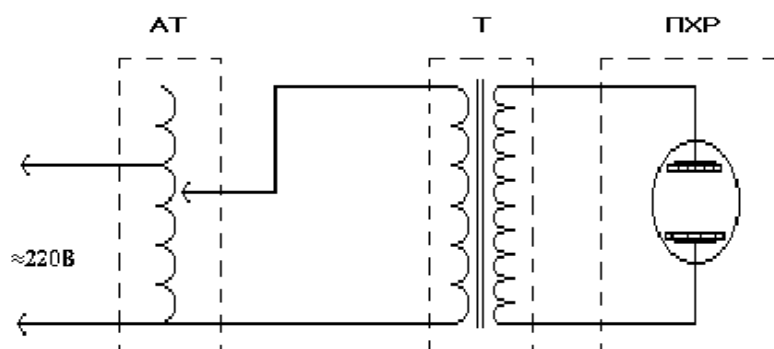


Рис. 2. Схема электрического питания. АТ - автотрансформатор, Т - повышающий трансформатор, ПХР - плазмохимический реактор с БР.

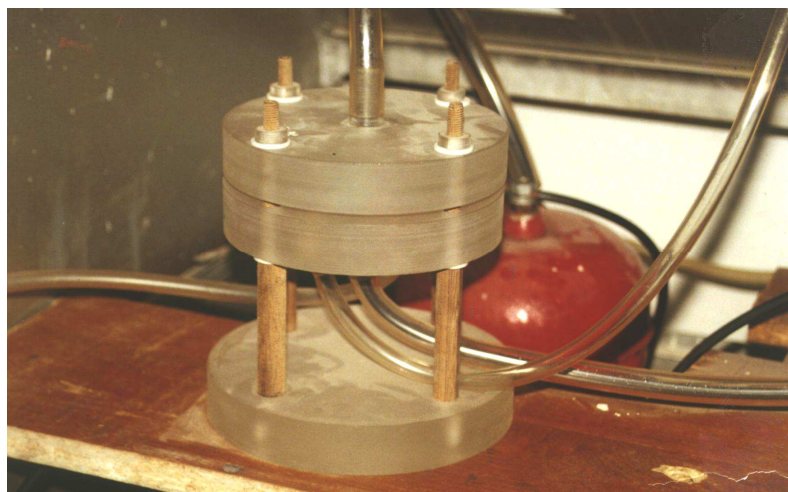


Рис. 3. ПХР

### 1.2. БР в диэлектрической трубке с металлической спиралью.

Этот вид разряда был предложен проф. В.С.Энгельштом и запатентован [6]. Он представляет собой следующее устройство (рис. 4): в диэлектрическую трубку помещается металлическая спираль. На эту спираль подается переменное напряжение 10 кВ, 50 Гц. Трубка находится в сосуде с проточной водой для охлаждения. Вода также служит вторым электродом. При подаче высокого напряжения на спираль возникает БР, который распространяется по внутренней поверхности диэлектрической трубки. Через трубку пропускается кислород, в котором БР нарабатывает озон. Также можно получать различные концентрации и наработку в зависимости от расхода кислорода.

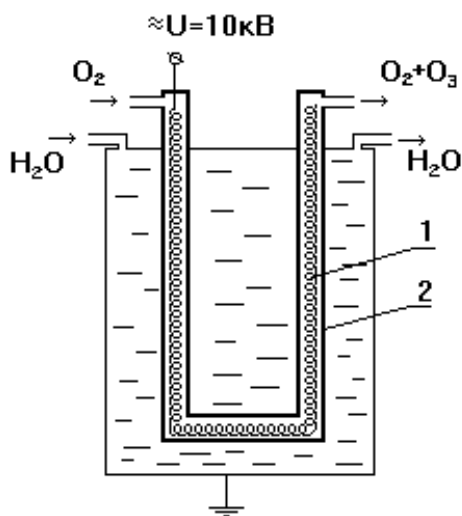


Рис. 4. БР в диэлектрической трубке с металлической спиралью.

### 1.3. БР на двухжильном проводе.

Третий вид БР также основан на патенте В.С.Энгельшта [7], это БР на двухжильном проводе. При подаче на жилы двухжильного провода переменного высокого напряжения на поверхности этого двухжильного провода возникает барьерно - поверхностный разряд (БПР). В начале при небольшом напряжении он появляется на перемычке, потом, с увеличением напряжения постепенно покрывает всю поверхность диэлектрика (рис. 5). Причина появления разряда на поверхности диэлектрика заключается в том, что при возникновении высокой разности потенциалов между жилами провода также возникает напряженность поля на поверхности самого диэлектрика, при этом

свободные затравочные электроны воздуха разгоняются и создают лавины – стримеры путем ионизации. Основное применение этого разряда - озонирование воздуха.

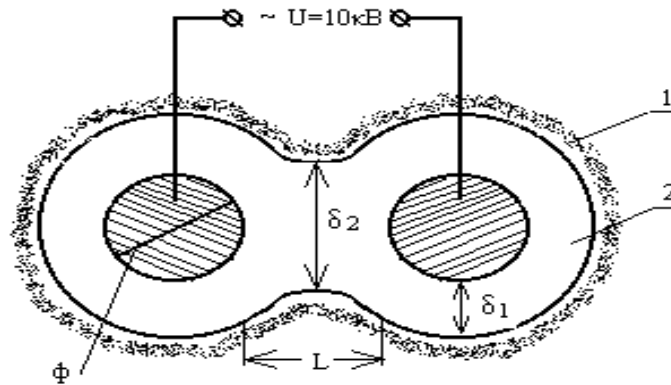


Рис. 5. БР на двухжильном проводе.  $\Phi$  – диаметр жилы (1,6 мм),  $L$ –длина перемычки (4мм),  $\delta_1$ –ширина диэлектрической обмотки (0,65 мм),  $\delta_2$ –ширина перемычки (0,4 мм), 1–барьерный разряд, 2–поливинилхлорид.

#### 1.4. БР на подвижном диэлектрике.

Следующий вид разряда, который изучается нами, это разряд на подвижном диэлектрике [3]. Устроен этот разряд следующим образом.

Устройство представляет собой полый цилиндр, размещенный на оси с подшипниками, который может вращаться (рис. 6).

Металлический цилиндр сверху покрыт тонкой диэлектрической пленкой и с

внешней стороны установлены два или несколько электродов. Это устройство представляет собой простейший конденсатор, емкость которого тем больше, чем тоньше диэлектрическая пленка. Оно работает как на переменном, так и на постоянном токе. Вид сверху такого устройства показан на рис. 7.

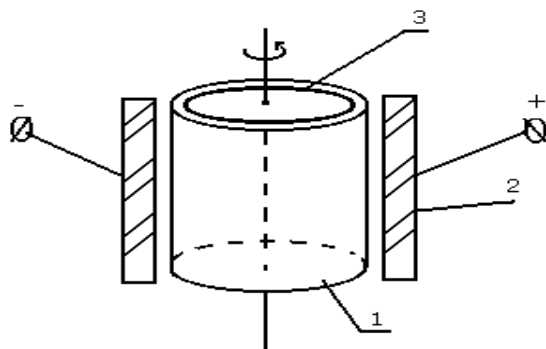


Рис. 6. БР на подвижном диэлектрике.  
1 - диэлектрическая пленка,  
2 - электроды, 3 - металлический (полый) цилиндр

Как работает этот разряд? При подаче достаточно высокого напряжения возникает разряд с электродов на поверхность, при этом на пленку оседают заряды. Заряды на поверхности пленки имеют тот же знак, что и данный электрод.

Поэтому между электродами и зарядами на пленке возникают кулоновские силы отталкивания, которые приводят во вращение этот цилиндр. Цилиндр начинает вращаться. Чем больше напряжение питания, тем больше величина тока и тем больше скорость вращения этого диэлектрика (цилиндра). Возможно другое использование этого подвижного диэлектрика. Это принудительное вращение от двигателя с варьированной частотой в некотором диапазоне. Этот разряд изучается нами как с точки зрения интересных физических процессов, связанных с оседанием зарядов на подвижном диэлектрике, его взаимодействием с электродами, так и практического использования этого устройства для озонирования воздуха в помещении [8].

#### 1.5. Источник тока.

Для увеличения возможности изучения различных видов БР разработан специализированный высоковольтный газоразрядный источник тока (ВГИТ) [9]. ВГИТ является источником тока, так как

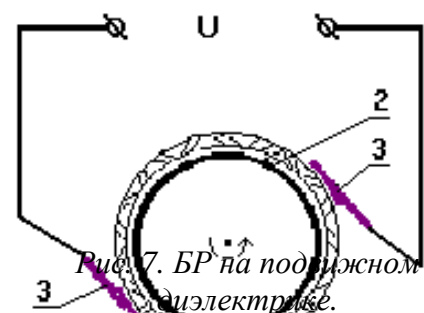
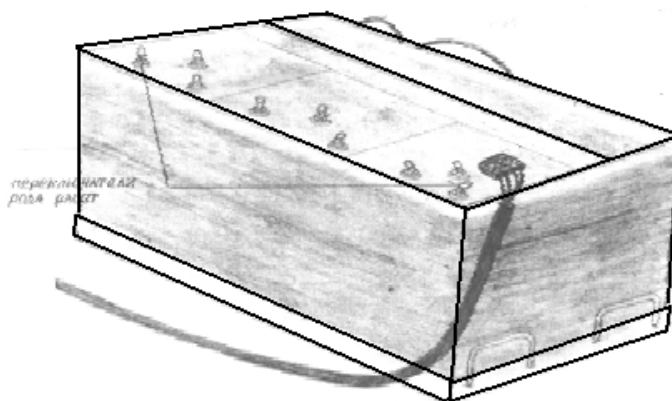


Рис. 7. БР на подвижном диэлектрике.  
1 - металлический цилиндр,  
2 - диэлектрик, 3 - разряд

имеет большое внутреннее реактивное сопротивление. ВГИТ изготовлен из 6 высоковольтных трансформаторов ТГ-1020 ( $U_{вх}=220$  кВ,  $U_{вых}=10$  кВ,  $I_{вых}=20$  мА) собранных по трехфазной схеме и трехфазного мостика ( $m=6$ ) с фазным выпрямителем состоящего из 36 высоковольтных диодов Д1006 ( $U_{обр}=6$  кВ,  $I_{мах пр}=100$  мА). Во избежания пробоя трансформаторы и диодный мостик помещаются в трансформаторное масло. Внешний вид ВГИТ показан на рис. 8. Разработана электрическая схема ВГИТ. Данный источник тока имеет несколько режимов (всего 6) работы. Режим работы источника зависит от того, как подсоединены между собой первичные и вторичные обмотки трансформаторов.

Электрические характеристики и методы соединения первичной и вторичной обмотки режимов приведены в табл. 1.



*Рис.8. Высоковольтный газоразрядный источник тока.*

### **1.6. Электромеханический инвертор**

Повысить удельную мощность БР можно с помощью увеличения частоты питающего напряжения, при этом мощность увеличивается пропорционально частоте. Для достижения этого необходимо переходить от промышленной частоты (50 Гц) к повышенным частотам.

Был предложен новый и простой способ повышения частоты напряжения питания БР. В 2001 году был разработан и изготовлен электромеханический инвертор с плавной регулировкой частоты высоковольтного выходного напряжения [4]. Предлагаемое устройство имеет два диска, расположенных на одной оси электродвигателя. Диски идентичны и изготовлены из стеклотекстолита толщиной 3 мм и диаметром 0,5 м. На каждом диске имеются медные кольца диаметром 30 см с отходящими от них лучами длиной 5 см и шириной 3 мм. Количество лучей 32. Принцип работы инвертора показан на рис. 9.

таблица

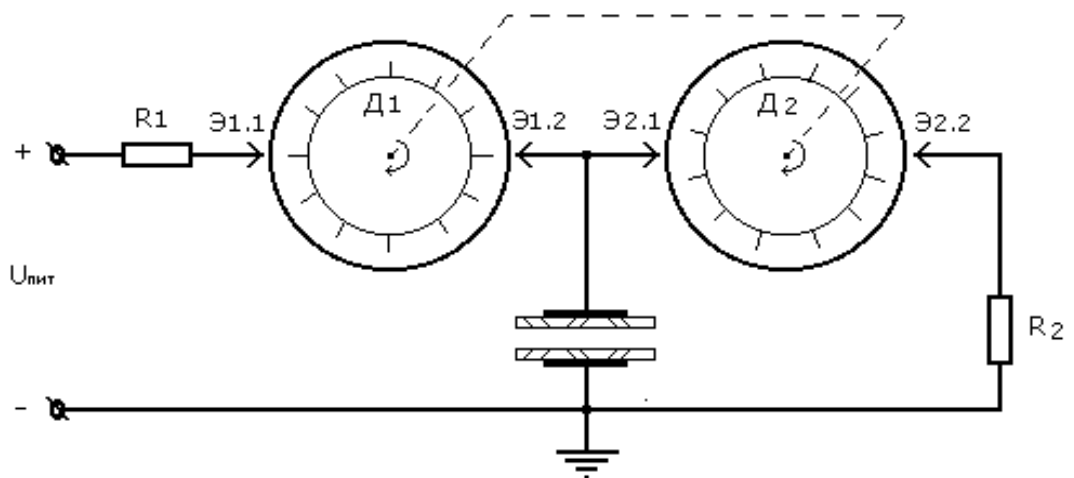


Рис. 9. Принцип работы электромеханического инвертора.

Электромеханический инвертор работает следующим образом. Разрядные контакты  $\mathcal{E}_{1.1}$ ,  $\mathcal{E}_{1.2}$ ,  $\mathcal{E}_{2.1}$ ,  $\mathcal{E}_{2.2}$  инвертора установлены таким образом, что при вращении дисков в тот момент, когда контакты  $\mathcal{E}_{1.1}$  и  $\mathcal{E}_{1.2}$  замкнуты, контакты  $\mathcal{E}_{2.1}$  и  $\mathcal{E}_{2.2}$  находятся в разомкнутом

состоянии. В результате этого барьерный разрядник заряжается от высоковольтного источника питания (работает зарядная цепь: источник питания –  $R_{1,1}$  –  $\mathcal{E}_{1,1}$  –  $\mathcal{E}_{1,2}$  – БР). Затем, при дальнейшем повороте дисков, размыкаются зарядные контакты  $\mathcal{E}_{1,1}$  и  $\mathcal{E}_{1,2}$ , а замыкаются контакты  $\mathcal{E}_{2,1}$  и  $\mathcal{E}_{2,2}$ . Происходит разрядка емкости БР через  $R_2$ . В дальнейшем этот процесс повторяется. Тем самым, плавно изменяя частоту вращения дисков инвертора можно регулировать частоту напряжения на БР.

## 2. Методы исследования

Основные методы исследования основаны на осциллографировании электрических характеристик БР [5, 10-12] и измерении концентрации и наработки озона [2, 13].

### 2.1. Осциллографирование БР

При осциллографировании БР регистрируются изменения во времени тока и напряжения разряда с помощью электрической схемы показанной на рис. 10.

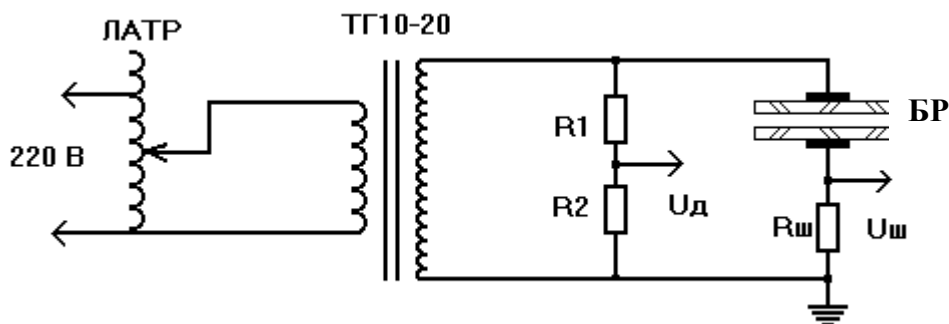


Рис. 10. Электрическая схема измерения.

ЛАТР – лабораторный автотрансформатор РН, ТГ-1020 – высоковольтный трансформатор. БР – камера барьерного разряда,  $R_{ш}=26,6$  кОм,  $R_1=48$  кОм,  $R_2=150$  кОм резисторы делителя напряжения.

Осциллограммы тока  $I(t)$  и напряжения  $U(t)$  регистрируются синхронно на двухлучевом осциллографе, мгновенные значения тока и напряжения пересчитывались по формулам:

$I(t)=U_{осц}(t)/R_{ш}$ , где  $U_{осц}(t)$  – напряжение, регистрируемое осциллографом на шунте.

$U(t)=(R_1+R_2/R_2)U_{2осц}(t)$  – напряжение, регистрируемое осциллографом на  $R_2$ .

Пример осциллограмм  $I(t)$  и  $U(t)$  показаны на рис. 11.

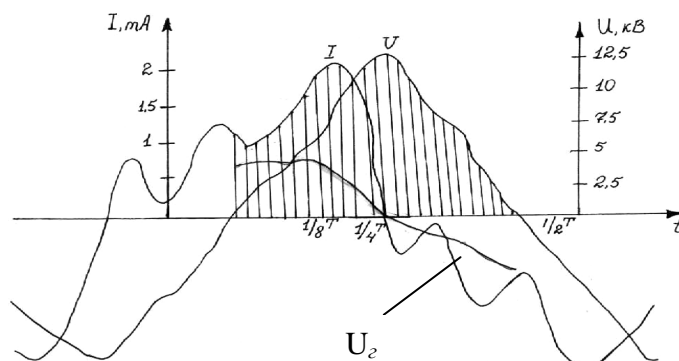


Рис. 11. Осциллограммы тока  $I(t)$  и напряжения  $U(t)$  БР.  $U_2(t)$  – напряжение горения.

Как видно, сдвиг фаз между током и напряжением составляет  $90^\circ$ , что соответствует в основном емкостной нагрузке БР. Однако, происходит деформация формы тока  $I(t)$  и напряжения  $U(t)$  – они отличаются от синусоиды. Именно это соответствует наличию активного сопротивления в цепи БР [1].

Из осциллограмм тока  $I(t)$  и напряжения  $U(t)$  могут быть вычислены следующие величины:

Средний ток	$I_{cp} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2}  I(t)  dt,$
Полная мощность (ВА)	$N = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} I(t)U(t) dt$
Активная мощность	$W = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} I(t)U(t) dt$
Реактивная мощность	$N_p = \sqrt{N^2 - W^2}$

где  $T$  – период колебаний переменного тока.

При вычислении электрических характеристик БР интегралы заменяются суммой, например:  $I_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |I_i|$

БПР отличается от барьерного динамической емкостью  $C$ , обусловленной покрытием диэлектрика плазмой разряда [14].

Общая емкость озонатора определяется из реактивной мощности БР:

$$N_p = I_{cp}^2 R_c = \frac{I_{cp}^2}{2\pi\nu C}, \text{ где } R_c - \text{емкостное сопротивление БР.}$$

$$C = \frac{I_{cp}^2}{2\pi\nu N_p}$$

При регистрации циклограммы использовалась электрическая схема, аналогичная рис. 10, где шунт заменяется на измерительный конденсатор  $C_{изм}=1\text{мкф}$ .

БПР на двухжильном проводе существенно отличается от классического БР [15,16]. Отсутствует газовый зазор, емкость барьера изменяется в течение полупериода из-за различной площади диэлектрика, покрытой плазмой разряда. В результате циклограмма не имеет сравнительно простой формы параллелограмма [4,5]. Пример циклограммы показан на рис. 12.

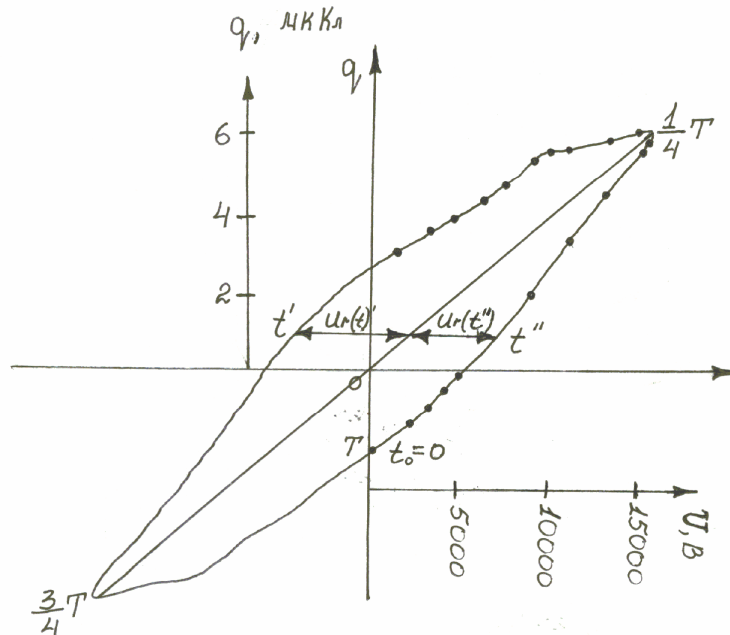


Рис. 12. Циклограмма БПР на двухжильном проводе при напряжении  $U_{эф}=9\text{кВ}$ .

По площади циклограммы можно находить активную мощность, какой бы сложной ни была циклограмма [4,5]. Ибо интеграл



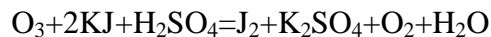
$W = \frac{1}{T} \int_0^T U(t)I(t)dt = v \int U(q) dq$  выполняется тождественно и не зависит от вида нагрузки (активная, емкостная, смешанная и т.д.).

Более сложная ситуация с определением напряжения горения  $U_r$  разряда. В [5] было сделано предположение, что отрезок, отсекаемый средней линией циклограммы  $(3/4)T \div (1/4)T$  и ее образующей вдоль  $U(t)$  при фиксированном значении  $q$ , есть напряжение горения на разряде. На рис. 12 показаны два значения  $U_r(t')$  и  $U_r(t'')$  в моменты времени  $t'$  и  $t''$ . Точками на циклограмме отмечены моменты времени периода, полученные из соответствия напряжения питания на циклограмме и осциллограмме  $U(t)$ . (рис. 11). Нами предложено находить напряжение горения разряда как функцию времени  $U_r(t)$ . Следует отметить, что в отличие от классического БР [16] в барьерно-поверхностном разряде  $U_r$  меняется с течением времени [5]. Напряжение горения разряда  $U_r(t)$  синхронно меняется с током разряда (см. рис. 11), как оно и должно быть при активной нагрузке (разряд), тогда как между напряжением питания  $U(t)$  и током разряда  $I(t)$  сдвиг фаз составляет  $90^\circ$ , что обусловлено в основном емкостной нагрузкой БР.

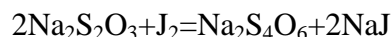
## 2.2. Йодометрический метод

Сущность йодометрического метода определения концентрации озона [13] заключается в следующем. В барботер наливается раствор йодистого калия  $KJ$  и серной кислоты (рис. 13).

Под действием озона выделяется свободный йод  $J_2$  по уравнению:



После реакции раствор окрашивается, затем выделившийся йод оттитровывается тиосульфатом натрия по уравнению:



При титровании раствор обесцвечивается и по количеству затраченного титра определяется количество озона, который прошел через барботер.

Зная расход воздуха и кислорода можно определить концентрацию озона в газе по уравнению:

$$C = \varepsilon_0 \frac{V_T M_T}{V},$$

где  $\varepsilon_0 = 24$  г/моль – молекулярная масса эквивалента озона;  $M_T$  – молярная концентрация раствора тиосульфата, моль/литр;  $V_T$  – объем раствора тиосульфата, пошедшего на титрование, мл;  $V$  – объем газа прошедшего через раствор, л.

Наработку озона определяют по известной концентрации озона:

$$G_{O_3} = C_{O_3} \cdot V,$$

где  $V$  – объем озono-воздушной смеси, проходящей через раствор.

Энергозатраты на синтез озона зависят от значения активной мощности озонатора и наработка озона и вычисляется по формуле:

$$Q_{O_3} = \frac{W}{G_{O_3}}.$$

## 3. Основные результаты

### 3.1. Классический БР в смеси фреона с кислородом

Установка испытана при Уэф. напряжения от 2 до 30 кВ в газах воздуха, кислороде и смеси фреона в кислороде. Межэлектродное пространство  $d=3,0$  мм,  $P=1$  атм. Визуально определены  $U_{зак}$ . БР. Напряжение зажигания разряда визуально можно оценить для воздуха  $U_{зак.}=6,6$  кВ. Для чистого кислорода получена  $U_{зак.}=5,8$  кВ. По данным [1]

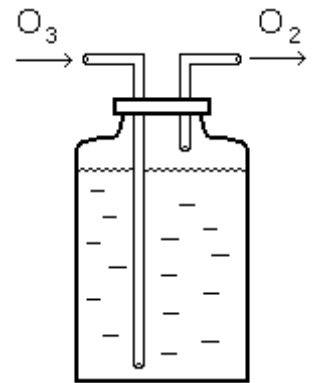


Рис. 13. Барботер.

напряжение зажигания (и горения) БР в кислороде при таком же межэлектродном промежутке  $U_r=6,4$  кВ.

В настоящее время  $U_{зж.}$  БР в смеси фреона в кислороде отсутствует, имеются данные для чистого фреона  $C Cl_2 F_2$ , при коронном разряде  $U_r=12-13$  кВ при  $P=1$  атм. [17].

Напряжение зажигания БР в 75 % смеси фреона с кислородом визуально можно оценить величину  $U_{зж.}=17,5$  кВ, что существенно выше, чем в чистом кислороде [18].

### 3.2. БР в диэлектрической трубке с металлической спиралью.

В научно-исследовательской лаборатории изготовлен медицинский озонатор. Он предназначен для озонирования жидкостей (растительное мыло, физиологические растворы и т.д.), применяемых в лечебной практике (ожоги, кожные заболевания, гинекология, косметика и т.д.) [3]. Установка (рис. 14) состоит из следующих элементов: 1 - озонатор, 2 - кислородный баллон, 3 - трансформатор, 4 - сосуд с силикагелем.

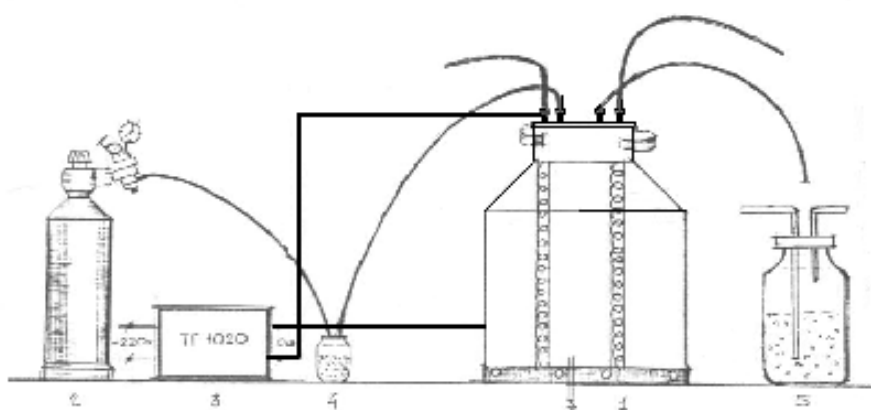


Рис. 14. Озонатор медицинский.

Спираль, находящаяся внутри диэлектрической трубки является первым электродом, вторым электродом является вода. Барьером между спиралью и водой служит диэлектрическая трубка из ПВХ. К отверстиям, имеющимся на крышке металлической емкости, закреплены с помощью зажимов 4 диэлектрической трубки. Две трубки служат для циркуляции воды. Через одну проточная вода вводится, через другую она выводится. Еще одна трубка служит для подачи кислорода 2. Подача газа в озонатор регулируется с помощью редуктора, установленного на кислородном баллоне. Кислород из баллона, прежде чем попасть в озонатор, проходит через силикагель (4). Силикагель служит для того, чтобы очистить газ от влаги. Наличие влаги в кислороде отрицательно влияет на выработку озона. Получена зависимость концентрации, наработки и энергозатрат озона от расхода газа при постоянном напряжении  $U_{эф}=6,0$  кВ и активной мощности озонатора  $W_a=73$  Вт. Результаты приведены в табл. 2.

*Зависимости концентрации, наработки и энергозатрата озона от расхода газа.*

Таблица 2

№	V, л/мин.	С <sub>О<sub>3</sub></sub> , г/м <sup>3</sup>	G <sub>О<sub>3</sub></sub> , г/час	Q, кВт ч/кг
1.	0,4	18,7	0,4	182
2.	0,9	20,8	1,1	63
3.	1,0	22,2	1,3	54
4.	1,2	26,1	1,9	38
5.	1,3	26,0	2,0	36
6.	1,5	28,0	2,5	30
7.	1,7	25,0	2,6	28
8.	2,0	26,0	3,1	23

На медицинском озонаторе были определены концентрация, наработка и энергозатраты озона при различных расходах газа. Выявлено, что с увеличением расхода газа наработка озона возрастает, а энергозатрата на его синтез падает.

### 3.3. БР на двухжильном проводе

Для обработки медицинских инструментов и семян элитных сортов использована лабораторная установка. На ней изучаются энергетические характеристики БР и наработка озона, которая представлена на рис. 15.



*Рис. 15. Установка для изучения энергетических характеристик БР и наработки озона.*

Озонатор представляет собой двухжильный провод длиной от 1 до 20 м, намотанный в виде спирали внутри картонного цилиндра и закрепленный над цилиндром на вентиляторе, который служит для того, чтобы циркулировать озono-воздушную смесь. Озонатор помещен внутри герметизированного, четырехугольного ящика размерами: длина 1,17 м, ширина 0,44 м, высота 0,42 м, объем 0,21 м<sup>3</sup>. Ящик изготовлен из текстолита. Откачанная смесь поступает в барботер, где озон вступает в химическую реакцию, проходя через раствор йодистого калия и серной кислоты.

С целью визуального наблюдения БПР лицевая часть установки герметично закрыта прозрачным органическим стеклом. При возникновении БР на двухжильном проводе наблюдается сиреневое свечение. Конец двухжильного провода подсоединяется к трансформатору ТГ-1020, на который подается переменное напряжение от лабораторного автотрансформатора (ЛАТР). Для нормальной работы высоковольтного трансформатора (ТГ-1020), т.е. во избежание пробоя или паразитных разрядов в корпус залито трансформаторное масло с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 2,2$ . На этой установке (с длиной двухжильного провода  $L=5$  м) исследована концентрация озона при постоянном напряжении  $U_{\text{эф}}=10$  кВ и отборе газа  $V=0,6$  л/мин.

Йодометрическим методом была определена концентрация озона. По данным трех измерений и с помощью интуитивного метода наименьшего квадрата построили график зависимости концентрации озона от времени синтеза (рис. 16). Из графика видно, что в начальный момент времени от 0 до 1 часа 20 минут концентрация озона медленно (нелинейно) растет. Концентрация озона росла бы быстрее, если бы внутри емкости не происходил распад озона. Одной из причин распада озона является нагрев проводов и разрушение озона самим разрядом [3]. В отсутствие этих причин линия графика проходила бы по пунктирной линии (см. рис. 16) при дальнейшем увеличении времени

синтеза с 1 часа 25 минут до 1 часа 40 минут концентрация озона не меняется, то есть происходит насыщение и оно составляет  $CO_3=4,6\text{г/м}^3$ .

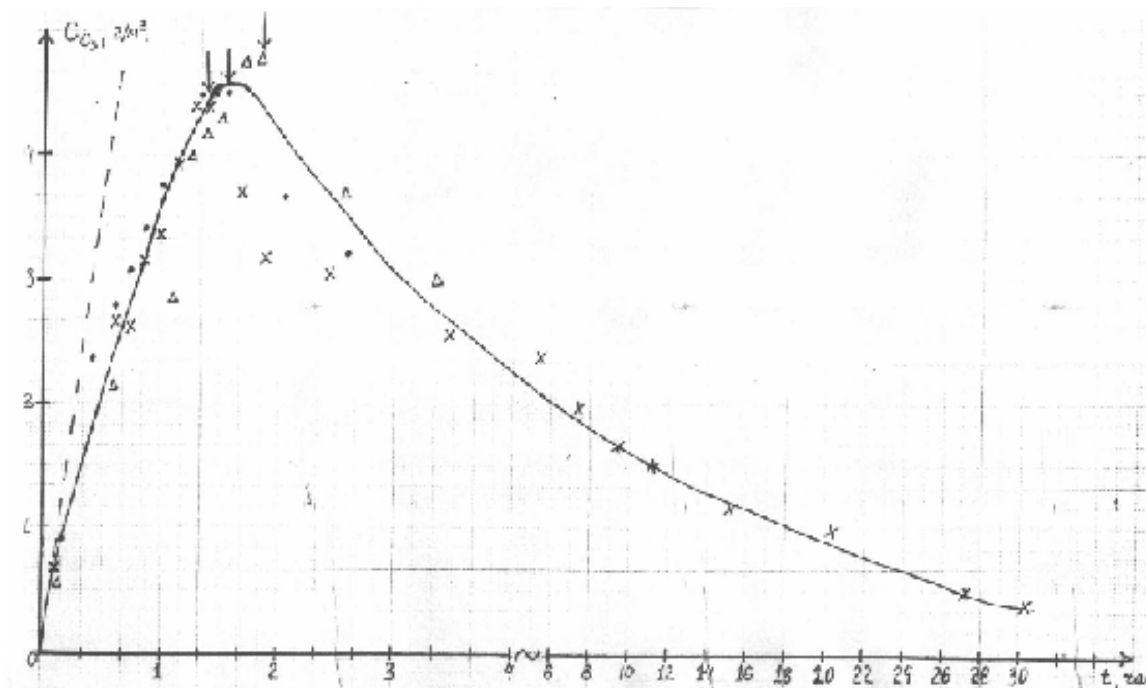


Рис. 16. Зависимость концентрации озона от времени синтеза.  
Стрелками показаны время отключения озонатора

- - измерение 11.02.02
- Δ - измерение 27.02.02
- X - измерение 04.03.02.

В точке насыщения, в 1 час 40 минут был выключен озонатор и в дальнейшем изучался распад озона. Это важно для того, чтобы определить время для обработки медицинских инструментов (скальпели, ножницы и т.п.) и элитных сортов семян. Из рисунка видно, что с течением времени концентрация озона медленно уменьшается, и происходит медленный распад озона. Через 28 часов после выключения озонатора определялась концентрация озона в емкости, она равнялась  $0,4\text{ г/м}^3$ . Кроме того, было исследовано влияние времени синтеза на наработку озона и энергозатраты озона. При различной длине провода изучены электрические характеристики озонатора. По осциллограммам тока и напряжения рассчитана полная, реактивная, активная мощности и динамическая емкость на двухжильном проводе (табл. 3).

*Электрические характеристики БР и концентрации озона при напряжении  $U_{эф}=10$  кВ, отборе газа  $V=0,6$  л/мин.*

Таблица 3

L, м	$I_{cp}, \text{mA}$	N, Вт	W, Вт	$N_p, \text{Вт}$	$C_{эф, \text{пФ}}$	$CO_3, \text{г/м}^3$
1.	1,4	8,3	3,6	7,5	832	3,4
5.	4,5	87	14,5	85,6	853	4,6
10.	8,3	174,6	21,5	173,3	1423	4,7
15	13	235	35	232	2500	4,8

В 2000-2002 гг. в лаборатории «Физика и техника плазмы» разработаны и изготовлены озонаторы разных типов на основе двухжильного провода .

Разработан подвесной озонатор на двухжильном проводе. Нарботка озона 5 г/ч. Данный озонатор может быть использован для стерилизации помещений больниц, общественных и животноводческих помещений, для предпосевной обработки семян и повышения сохранности зерна, фруктов и овощей при хранении. А также разработан переносной озонатор. Нарботка озона составляет 0,1 г/час. Он предназначен для

озонирования воздуха, с целью дезинфекции и дезодорации в бытовых помещениях. На диэлектрической трубке намотан двухжильный провод в виде спирали.

### 3.4. БР на подвижном диэлектрике

В данной работе для изучения электрических характеристик БР, разработан и изготовлен электростатический двигатель. Электростатический двигатель состоит из ротора и статора. Ротор состоит из фольгированного медью текстолитового и прижимного дисков, между которыми располагается фторопластовая пленка. Ротор закрепляется на вентиляторе с помощью винта. Здесь вентилятор играет роль подшипника, а также служит для откачки озона воздушной смеси. Статор состоит из четырех пар ножеобразных электродов, на которые подается высокое напряжение. Эти электроды закреплены на восьми стойках из текстолита, на котором крепится корпус вентилятора (рис. 17).

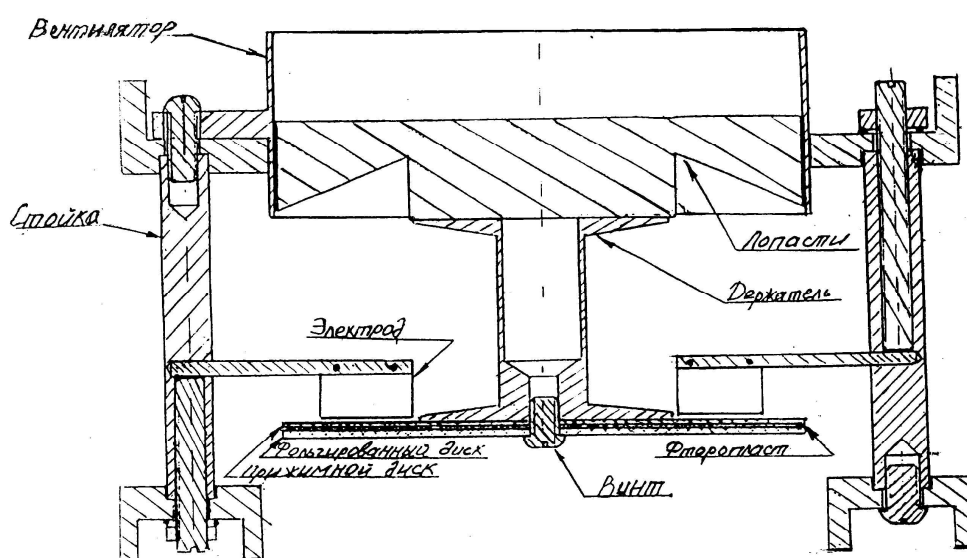


Рис. 17. Схема электростатического двигателя.

Данное устройство позволяет исследовать осциллограммы тока и напряжения, ВКХ разряда и т.д. Определена зависимость частоты вращения подвижного диэлектрика от напряжения при автовращении (табл. 4).

Зависимость частоты автовращения подвижного диэлектрика от напряжения

Таблица 4

№	U <sub>эф.</sub> , кВ	Переменный ток	
		v, Гц	Постоянный ток
			v, Гц
1.	4,6	—	6,4
2.	5	0,07	—
3.	5,5	0,23	13,3
4.	6,1	0,68	15
5.	7,2	1	16,5
6.	8	1,5	17,8
7.	8,8	—	20

Из табл. 4. видно, что с увеличением напряжения частота вращения диэлектрика возрастает при питании как переменным, так и постоянным напряжением. На постоянном токе частота вращения выше чем, на переменном при одних и тех же значениях напряжения. Так же проводилось исследование электростатического двигателя при принудительном вращении.

Были сняты циклограммы (ВКХ) БР на подвижном диэлектрике при различных частотах вращения подвижного диэлектрика и фиксированном, переменном напряжении на разряде  $U_{эф} \approx 8,5$  кВ, при увеличении частоты  $\nu$  вращения подвижного диэлектрика наблюдается изменение циклограмм. По площади снятых циклограмм были рассчитаны активные мощности  $W$  при фиксированном, переменном напряжении на разряде и различных частотах вращения подвижного диэлектрика. По полученным значениям построена зависимость  $W=f(\nu)$ , которая показана на рис. 18 и имеет нелинейный вид.

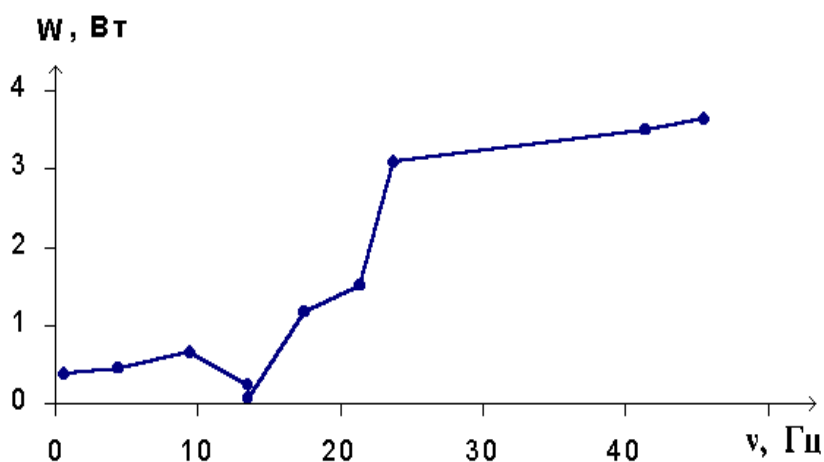


Рис. 18. Зависимость  $W=f(\nu)$ .

Экспериментально выявлено, что при частоте вращения подвижного диэлектрика  $\nu=12,5$  Гц (при питании переменным напряжением), разряд на некоторое время исчезал, и снова появлялся, что было видно визуально, а так же по снятой циклограмме (т.е. площадь этой циклограммы резко уменьшалась). Это связано с тем, что при определенной частоте заряды, оседающие с одного электрода, подходят к противоположному электроду, когда ток поменял знак, т.е. они имеют одинаковые заряды и ток замирает.

### 3.5. Источник тока

Были апробированы режимы работы ВГИТ на различных разрядах, таких как тлеющий, барьерный, искровой и коронный.

Также были определены:

1. Напряжение холостого хода.
2. Максимальные токи режимов на различных разрядах.
3. Эффективное напряжение.

Все данные содержатся в таблице 5. Причем необходимо отметить, что все экспериментальные данные согласуются с расчетными характеристиками. Расчетные характеристики также включены в данную таблицу. А то, несоответствие, которое наблюдается, объясняется повышенным напряжением в сети.

*Характеристики ВГИТ.*

*Таблица 5.*

Режимы работы	$U_{эф}, кВ$	$U_{эф}, кВ$	$I_{эф}, мА$	$I_{эф}, мА$
	расч	Изм.	расч	изм
1	10	11	20; 40; 60; 80; 100; 120	19,5; 42; 63; 87; 109; 123
2	20	20,5	20; 40; 60	19,5; 42; 63
3	10	10,8 11,1 11,3	20; 40	19,5; 42
4	20	20,5 20,9 21,2	20	19,5
5	23,4	24	20; 40	19,5; 42
6	46,8	46,8	20	19,5

### 3.6. Электромеханический инвертор

Были сделаны юстировка и балансировка узлов электромеханического инвертора для достижения максимальной частоты вращения «дисков-прерывателей» [9].

Юстировка заключается в том, чтобы установить диски так, что их плоскости были перпендикулярны оси двигателя. Это достигли тем, что фторопластовую втулку заменили на металлическую и поставили юстировочные прокладки.

Балансировка заключалась в устранении биения дисков. Это достигалось стачиванием дисков в некоторых местах с тем, чтобы получить равномерное и симметричное распределение массы по плоскости дисков. Получена зависимость частоты следования разрядов инвертора от напряжения питания двигателя (рис. 19).

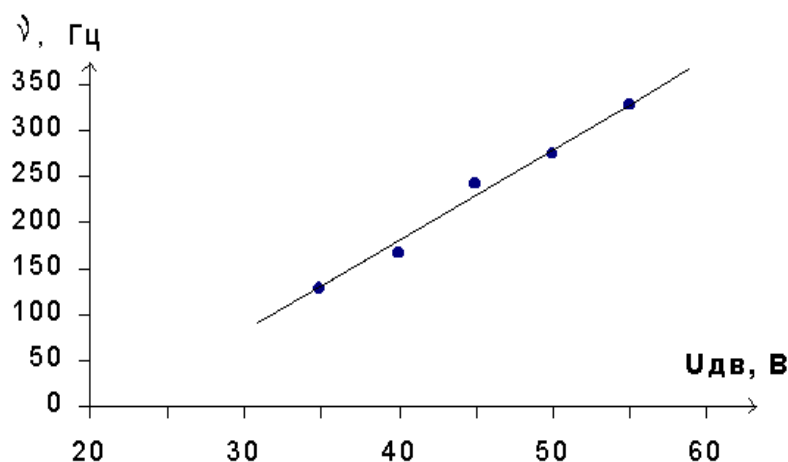


Рис. 19. Зависимость частоты следования разрядов от напряжения питания двигателя.

Частоту выше 328 Гц получить не удалось, в связи с тем, что возникает сильная вибрация дисков инвертора.

Были проведены измерения активных мощностей БР при его питании напряжением промышленной частотой  $\nu=50$  Гц и при питании через электромеханический инвертор импульсным напряжением частотой  $\nu=286$  Гц. При переменном напряжении  $U_0=25$  кВ, частоте 50 Гц активная мощность составила  $W_a=39$  Вт, а при питании импульсным напряжением  $U_0=25$  кВ, частотой  $\nu=286$  Гц, активная мощность равна  $W_a=105$  Вт. Таким образом, с помощью электромеханического инвертора удалось повысить мощность барьерного разряда в 2,7 раза.

### Выводы

В результате работы лаборатории «Физика и техника плазмы» разработаны и развиты новые виды барьерного разряда: БР в диэлектрической трубке со спиралью, БР на двухжильном проводе, БР на подвижном диэлектрике. Изучены их электрические характеристики, наработка озона. На основе этих видов БР разработаны различные озонаторы, предназначенные для: обработки зерна, фруктов и овощей, что повышает сохранность и урожайность; стерилизации помещений и медицинских инструментов; приготовления биологически активных жидкостей.

Разработана плазмохимическая установка для БР в смеси фреона с кислородом.

Разработан и изготовлен высоковольтный газоразрядный источник тока (ВГИТ), предназначенный для увеличения возможности изучения различных видов БР.

Предложен и изготовлен принципиально новый электромеханический инвертор с плавной регулировкой частоты высоковольтного напряжения до 340 Гц.

Развит метод осциллографирования БР, позволяющий определять активную и реактивную мощность разряда и обусловленную разрядом динамическую емкость.

Развит метод обработки вольткулоновской характеристики (циклограммы) БР, позволяющий, наряду с активной мощностью, находить напряжение горения как функцию времени.

*Автор выражает благодарность профессору В.С. Энгельшту за постановку темы и полезные обсуждения.*

#### 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. Энгельшт В.С. /Лекции по спецкурсу «Физика газового разряда», «Плазмохимическая технология»-Каракол: ИГУ им.К.Тыныстанова, 1999-2000.
4. Плазмохимическое травление кремния. Отчет НИР, ИГУ, Научный руководитель профессор Энгельшт В.С. № ГР 0002630. Инв. №0002128. Каракол 2001. 30с.
5. Боромбаев М.К., Шаршембиев К., Энгельшт В.С. /Барьерно-поверхностный разряд на двухжильном проводе. // Вестник КРСУ, Бишкек. №2, 2002. – 53-58 с.
6. Энгельшт В.С., Ларькина Л.Т./Озонатор. Предпатент Кыргызской Республики № 39 от 28 сентября 1994, Бюл. №1,1996.
7. Энгельшт В.С. /Озонатор. Патент России № 17544647,15.04.92. Бюл. № 30, 15.08.92. Перерегистрация 20.05.93.
8. Пасынков В. , Окунев Ю. Что же изобретено? // Журнал техники молодежи.-№12, 1983.-с. 41.
9. Плазмохимическое травление кремния. Отчет НИР, ИГУ, Научный руководитель профессор Энгельшт В.С. № ГР 0002630. Инв. № 0002128. Каракол 2002. 22с.
10. СынковЕ., УдовенкоД., ШаршембиевК., Боромбаев М.К. /Осциллографирование барьерно-поверхностного разряда на двухжильном проводе. Матер. первой республ. научн. конф. студентов-физиков и молодых ученых. // Приложение к журналу «Вестник ИГУ». -Каракол. 2002. -С. 84-94.
11. Бубнов Е., Удовенко Д., Шаршембиев К., Боромбаев М.К. /Вольткулоновская характеристика барьерного разряда на двухжильном проводе. // Матер.первый республ. научн. конф. студентов-физиков и молодых ученых. Приложение к журналу «Вестник ИГУ». -Каракол.2002.- С. 94-103.
12. Кыдырова Э., Удовенко Д., Шаршембиев К., Боромбаев М.К. /Активная, реактивная и полная мощности озонатора. // Матер. первый республ. научн. конф. студентов-физиков и молодых ученых. Приложение к журналу «Вестник ИГУ».Каракол, 2002.- 103-110 с.



13. Разумовский С.Д., Заиков Г.Е. Озон и его реакции с органическими соединениями - М.: Наука, 1974.- 322 с.
14. 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.
15. Филиппов Ю.В., Емельянов Ю.М. /Электрическая теория озонаторов. Статические вольтамперные характеристики озонаторов. Физическая химия. Т 31, № 4. 1957.- с. 896-903.
16. Филиппов Ю.В., Емельянов Ю.М. /Теория динамических характеристик озонаторов. // Физическая химия. Т 31, вып.7, 1957. – с. 1628-1635.
17. Дж. Мик., Дж. Крэгс/Электрический пробой в газах - М.: ИЛ., 1960.- 605 с.
18. Боромбаев М.К., Тынаев А.Ж., Токтошев А., Сатыбалдиев У.К. /Установка для исследования барьерного разряда в смеси фреона с кислородом. // Вестник ИГУ, Каракол. №7, 2002, с. 34-42.