

Лабораторная работа № 2

Исследование работы барьерного озонатора

1. Цель работы

1. Ознакомление с конструкцией барьерного озонатора, принципом его работы и выходными параметрами.
2. Исследование режимов работы барьерного озонатора, определение концентрации озона, активной мощности разряда.

2. Предварительные сведения

Под озонатором в общем случае понимают устройство для получения озона. Современные озонаторы, в которых озон получают с помощью электрического разряда в воздухе или в кислороде, состоят из генераторов озона и источников питания и являются составной частью озонаторных установок, включающих в себя, кроме озонаторов, вспомогательные устройства: систему очистки и осушки рабочего газа (воздуха или кислорода), систему охлаждения, компрессор, измерительные устройства.

В настоящее время озон O_3 является газом, используемым в так называемых озонных технологиях: очистка и подготовка питьевой воды, очистка сточных вод (бытовых и промышленных стоков), отходов газов и др.

В зависимости от технологии использования озона производительность озонатора может составлять от долей грамма до десятков килограмм озона в час.

Из большого числа различных современных конструкций озонаторов, использующих электрический разряд для получения озона, наибольшее распространение получили озонаторы с так называемым барьерным разрядом. Произ-

водительность одного барьерного озонатора может составлять от граммов до 15 кг озона в час.

Барьерным разрядом называют разряд в узком газовом зазоре между плоскими или коаксиальными электродами, один из которых (или оба) покрыт слоем твердого диэлектрика (рис. 2.1). Если к электродам приложено переменное напряжение с амплитудой, превышающей пробивное напряжение газового промежутка, то в нем возникает разряд, состоящий из большого числа отдельных искр, дискретных в пространстве и во времени. Разряд продолжается до тех пор, пока мгновенное значение напряжения на электродной системе не достигнет U_{\max} . Особенностью барьерного разряда является локальное накопление заряда на поверхности диэлектрического барьера в процессе развития в промежутке каждой отдельной искры. Поясним это с помощью рис. 2.2.

Пусть к промежутку с барьером приложено переменное напряжение, при котором еще нет разряда. Это напряжение распределяется по емкостям барьера и газового промежутка, так что к газу приложено напряжение

$$U_{\Gamma} = U \cdot \frac{C_{\bar{6}}}{C_{\Gamma} + C_{\bar{6}}}, \quad (2.1)$$

где U — напряжение на электродах; $C_{\bar{6}}$ — емкость барьера; C_{Γ} — емкость газового промежутка.

Для цилиндрической системы электродов

$$C_{\bar{6}} = 2 \cdot \pi \varepsilon_0 \varepsilon_{\bar{6}} \cdot \frac{L}{\ln \frac{D}{D_{\text{вн}}}}; \quad C_{\Gamma} = 2 \cdot \pi \varepsilon_2 \varepsilon_0 \cdot \frac{L}{\ln \frac{D_{\text{вн}}}{D}}, \quad (2.2)$$

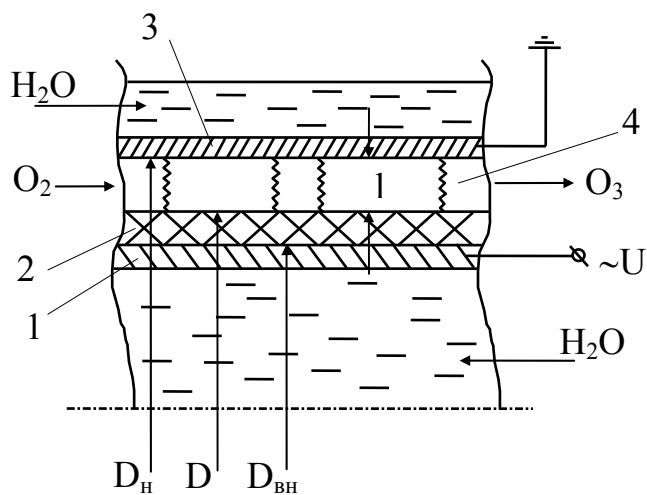


Рис. 2.1 Электродная система озонатора.

1, 3 - электроды; 2 - диэлектрический барьер; 4 - зона разряда.

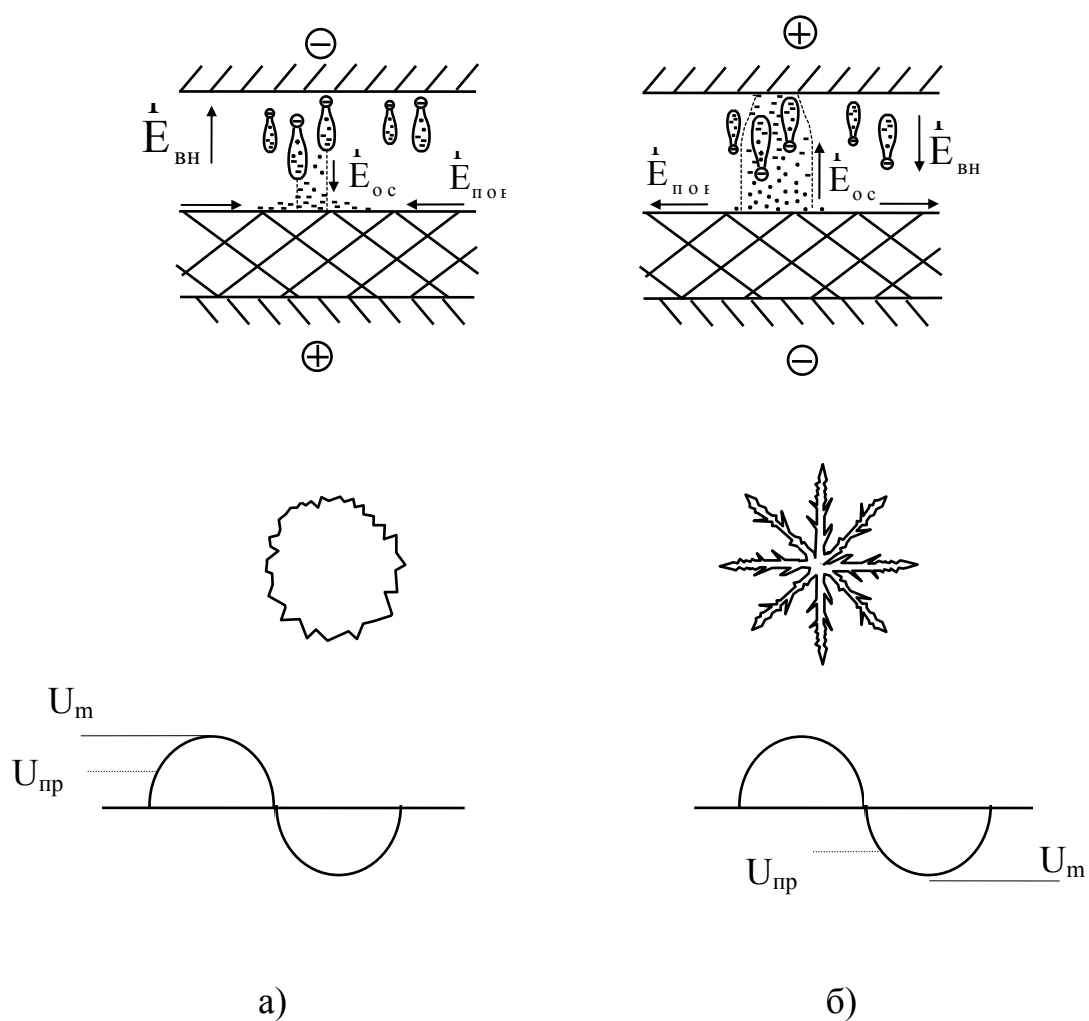


Рис. 2.2 Развитие разряда в промежутке озонатора

где ϵ_b и ϵ_g - диэлектрические проницаемости барьера и газа; L - длина электродов; D_n , D , $D_{вн}$ - диаметры электродов барьера (см. рис. 2.1).

Рассмотрим первый полупериод воздействующего напряжения, в который электрод с диэлектриком является анодом (рис. 2.2, а). Когда напряженность внешнего поля $E_{вн}$, создаваемого приложенным напряжением, достигнет значения начальной напряженности, в промежутке начинаются интенсивные ионизационные процессы и создается большое число лавин, продвигающихся по направлению к диэлектрическому барьеру. Расчеты показывают, что при нормальной плотности газа в разрядном промежутке длиной $l = 1 - 3$ мм развитие лавин может привести к созданию объемных зарядов с плотностью N , при которой выполняется условие перехода лавины в стример ($N = 10^8$ 1/см³). При выполнении этого условия в каком-то месте промежутка возникает стримерный канал, головка которого доходит до поверхности электрода, покрытого диэлектрическим барьером.

Происходит пробой газового промежутка по многолавино-стримерному механизму. Внешне разряд выглядит как искра. Этому процессу соответствует напряжение $U_{пр}$.

В ходе образования и движения лавин и, в особенности, при подходе к диэлектрическому барьеру головки стримера, на поверхность барьера оседают отрицательные заряды - электроны. Диаметр канала стримера составляет при рассматриваемых условиях $\approx 0,1$ мм. Примерно таких же размеров оказывается и пятно заряда, осевшего на барьер. Что касается положительных ионов, образовавшихся при развитии лавин, то, обладая гораздо меньшей подвижностью, они постепенно смещаются в сторону металлического катода. Подходя к нему, они нейтрализуются. Оседание отрицательного заряда на поверхность диэлектрического барьера вызвано большим объемным сопротивлением материала барьера (порядка $10^{14} - 10^{16}$ Ом-см). Большое поверхностное сопротивление

($10^{12} - 10^{17}$ Ом) препятствует растеканию заряда по поверхности. Образуется заряженный диск с максимальной плотностью заряда в центре диска. заряженный диск создает поле, имеющее как нормальную \dot{E}_{oc} , так и тангенциальную $\dot{E}_{\text{пог}}$ составляющие, под действием которой вдоль поверхности барьера начинается поверхностный разряд лавинного типа. В рассматриваемом нами случае отрицательно заряженного диска поверхностный разряд создает круглое пятно отрицательного заряда с диаметром, во много раз превышающим диаметр начального заряда. Одиночный разряд в промежутке может создать пятно диаметром до 15 - 17 мм (рис. 2.2, а).

Образовавшееся на барьере после поверхностного разряда пятно отрицательного заряда создает в разрядном промежутке свое поле с нормальной составляющей напряженности \dot{E}_{oc} , направленной встречно к приложенному внешнему полю. Измерения и расчеты показывают, что напряженность \dot{E}_{oc} может достигать нескольких кВ/см. В итоге суммарное поле в промежутке $\dot{E}_{\Sigma} = \dot{E}_{\text{вн}} - \dot{E}_{oc}$ снижается, и ионизационные процессы в этой части промежутка прекращаются. Разряд гаснет. Весь описанный процесс занимает время до десяти наносекунд, за которое приложенное напряжение не успеваает измениться. Одновременно начинается развитие стримера в другой части промежутка, где процесс повторяется.

Образование в разных точках искр и их затухание будет продолжаться до тех пор, пока приложенное напряжение не достигнет максимального значения U_m . После этого разряд в промежутке прекращается. Осциллограмма тока через промежуток выглядит так, как показано на рис. 2.3, где на кривую тока смещения \dot{I}_{cm} наложены импульсы тока отдельных искр.

Рассмотрим теперь полупериод, когда электрод с диэлектрическим барьером является катодом. При этом вновь рассматривается самый первый

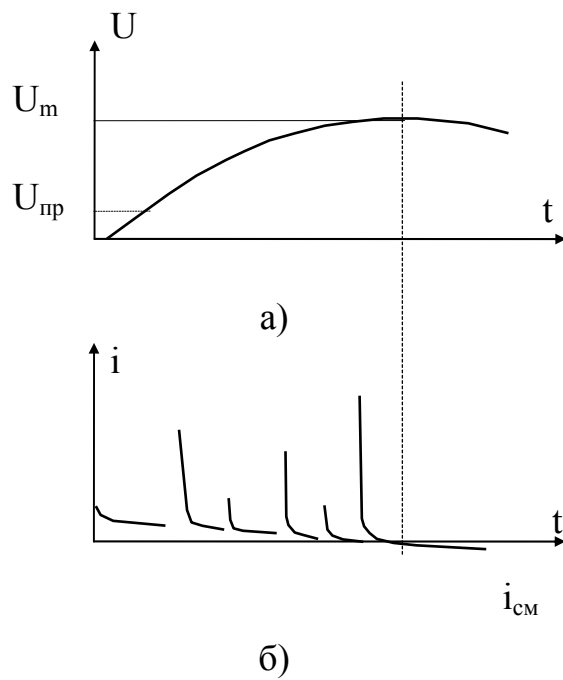


Рис. 2.3 Осциллограммы тока и напряжения

а) - осциллограмма напряжения на электродах; б) - осциллограмма тока через озонатор.

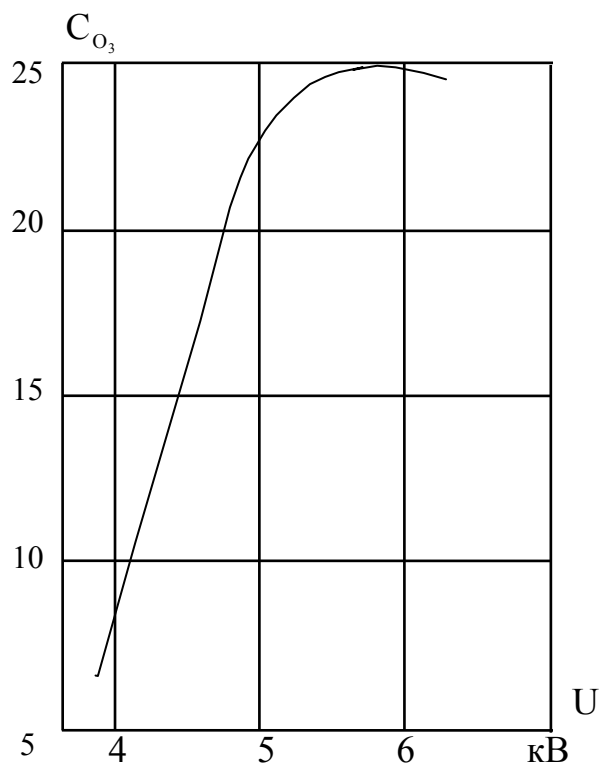


Рис. 2.4 Выход озона в зависимости от напряжения

Частота $f = 1500$ Гц; расход газа $v_r = 1$ л/мин.

полупериод, при котором развитие разряда в промежутке начинается при отсутствии заряда на диэлектрике.

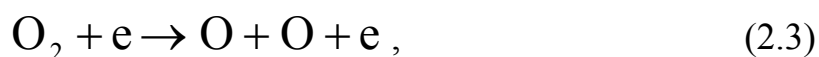
Развитие разряда идет в этом случае в направлении металлического электрода. Вновь образуется стример, но при подходе его головки к аноду все электроны уходят в металл. Накопления заряда на аноде не происходит. Но развитие стримера идет и в сторону катода, к которому перемещаются положительно заряженные ионы. Подходя к барьеру, они оседают на нем, образуя положительный заряд, являющийся причиной возникновения поверхностного разряда. В данном случае поверхностный разряд носит стримерный характер и на поверхности барьера остается пятно в виде звездочки (рис. 2.2, б), максимальная напряженность поля \dot{E}_{oc} , также составляет несколько кВ/см. В результате суммарная напряженность поля в промежутке снижается и разрядные процессы в этой части промежутка прекращаются. Диаметр звездочек одиночных разрядов достигает 20 - 25 мм. Когда напряжение на промежутке достигает U_m , разряд прекращается.

Иначе обстоит дело, когда разряд развивается в промежутке, в котором на диэлектрическом барьере уже имеется заряд, оставшийся от предыдущего полупериода. Поскольку поверхностное сопротивление материала барьера очень велико, заряд не успевает релаксировать за время одного периода. Распределение зарядов на поверхности к началу разряда в данный полупериод остается практически тем же, как в момент окончания разряда в предыдущий полупериод. Это означает, что в новый полупериод поле осевших зарядов складывается с внешним полем, усиливая его. Поэтому в местах, где расположены пятна или звездочки осевших зарядов, напряженность поля достигает начальной E_n раньше, чем в остальной части промежутка. Развитие ионизационных процессов и разряд оказываются “привязанными” к местам разряда в предыдущий полупериод.

Картина разряда в промежутке становится еще более сложной после длительного воздействия переменного напряжения. Но есть определенные законо-

мерности, проявляющиеся во всех случаях: в каждый полупериод разряд имеет вид отдельных, быстро затухающих искр. Разряд начинается, когда напряжение, приложенное к электродной системе, меньше разрядного напряжения газового промежутка. В каждый полупериод образуются импульсы тока, число и амплитуда которых являются статистическими величинами.

В процессе развития каждой отдельной искры происходят электрохимические реакции, результатом которых является образование озона и его разложение. Процесс образования озона состоит из нескольких этапов, хотя в общем случае число реакций, связанных с образованием озона и его разложением, превышает 70, существуют основные, без прохождения которых получение озона невозможно. Основной реакцией является процесс диссоциации молекул кислорода при взаимодействии со свободным электроном;



Постоянная времени этого процесса очень мала и составляет единицы наносекунд. Следующий этап состоит в образовании молекулы озона



в которой принимает участие третья частица M : молекула, ион, электрон или атом в нейтральном или возбужденном состоянии. Исследования показывают, что образование озона требует времени до 10 мкс.

Кроме образования озона, при движении частиц газа происходит разложения молекул O_3 по реакции



Эта реакция идет тем интенсивнее, чем выше температура газа. Образующийся в зоне разряда озон диффундирует в соседние области.

В результате прохождения рабочего газа через разрядную зону озонатора на выходе получается озono-воздушная или озono-кислородная смесь с концентрацией озона (10^{-1} - 10) г/м³, при этом получаемое количество озона зависит от превышения интенсивности образования над интенсивностью разложения.

Рассмотренный механизм развития разряда в однородном поле промежутка с диэлектрическим барьером на электроде позволяет установить те особенности, из-за которых барьерный разряд стал одним из основных источников озона. Главная особенность - дискретность разрядных процессов в пространстве и во времени. В течение части каждого полупериода воздействующего напряжения разряд распределен по всему промежутку. Это позволяет интенсивно охлаждать всю разрядную зону охлаждением электродов, что особенно важно для предотвращения термического разложения уже образовавшегося озона. Барьерный разряд, кроме того, является наиболее рациональной формой разряда и для образования озона. Барьер выступает в роли токоограничивающего сопротивления для каждой отдельной искры, что предотвращает большие токи, т.е. потери энергии на разогрев разрядного канала. Вместе с тем, в таком разряде процессы диссоциации молекул кислорода идут с наибольшей интенсивностью, что обеспечивается имеющим место распределением по энергиям свободных электронов.

Образование искры в каждой области промежутка, где напряженность поля превысит пробивную и затухание этой искры из-за спада напряженности поля, вызванного осевшими зарядами, поддерживает на электродах практически неизменное напряжение на газовом промежутке U_r в течение всего времени горения разряда в данный полупериод. Поэтому средняя напряженность поля в газовом промежутке в течение всего времени горения разряда лишь незначительно отличается от начальной. Постоянство напряженности обеспечивает

при разряде стабильное распределение электронов по энергиям, что важно для прохождения электрохимических реакций образования озона.

С ростом приложенного напряжения время горения разряда в каждый полупериод увеличивается, увеличивается число искр и возрастает выход озона. Однако почти пропорциональный рост выхода озона с ростом напряжения продолжается до определенного предела (рис. 2.4). С ростом числа искр увеличивается температура разрядной зоны, усиливается разложение озона. Работа озонатора при перегреве становится неэффективной. Поэтому рабочий режим озонатора должен лежать в области линейной части кривой зависимости концентрации озона C_{O_3} от напряжения.

Приведенное выше описание процессов в озонаторе отражает только физическую картину в газовом промежутке. Для электрической цепи, включающей источник питания и озонатор, последний представляет сложную нагрузку, изменяющуюся при каждом зажигании разряда. Анализ процессов в эквивалентной электрической цепи содержащей озонатор, позволяет связать физические процессы с электрическими величинами, определяющими эти процессы.

В эквивалентной электрической схеме озонатор может быть представлен двумя последовательно включенными емкостями: емкостью газового промежутка и емкостью барьера, как это было определено ранее.

Пусть к озонатору приложено переменное напряжение

$$U = U_0 \cdot \sin \omega t , \quad (2.6)$$

До начала разряда в газовом промежутке, т.е. при напряжении $U_{\Gamma} < U_{\text{пр}}$, приложенное напряжение распределяется по емкостям газового промежутка и барьера: $U = U_{\Gamma} + U_{\text{б}}$, причем

$$U_{\delta} = U \frac{C_r}{C_r + C_{\delta}} ; \quad U_r = U \frac{C_{\delta}}{C_r + C_{\delta}} , \quad (2.7)$$

Ток через озонатор равен

$$i = U_0 \omega \cdot \frac{C_{\delta}}{C_{\delta} + C_r} \cdot \cos \omega t , \quad (2.8)$$

Когда напряжение на газовом промежутке станет достаточным для его пробоя, в промежутке начинается разряд, напряжение на газовом промежутке становится равным напряжению горения разряда $U_{гор}$ и не меняется пока горит разряд. Тогда напряжение на диэлектрическом барьере может быть определено как

$$U_{\delta} = U_0 \cdot \sin \omega t - U_{гор} , \quad (2.9)$$

Ток через озонатор при разряде

$$I = \frac{d}{dt}(C_{\delta} \cdot U_{\delta}) = U_0 \cdot \omega \cdot C_{\delta} \cdot \sin \omega t , \quad (2.10)$$

Так как $\epsilon_{\delta} > \epsilon_r$, то суммарная емкость озонатора меньше емкости барьера, и при возникновении разряда ток скачком возрастает.

Как уже говорилось выше, кривая тока через озонатор при разряде имеет сложную форму, учитывающую импульсы тока отдельных разрядов. Поэтому обычно пользуются понятием среднего тока через озонатор при разряде

$$I_{\text{ср}} = (U_0 - U_{\text{г оп}}) \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \omega C_{\text{б}}, \quad (2.11)$$

Очень важной характеристикой, определяющей не только интенсивность ионизационных процессов в газовом промежутке, но и эффективность образования озона, является активная мощность разряда P , с ростом которой выход озона возрастает. Правильная оценка активной мощности при работе озонатора позволяет определить эффективность работы устройства в целом.

Расчет активной мощности в цепи переменного тока проводится по уравнению

$$P = \frac{1}{t} \int iU dt - \frac{1}{2\pi} \int iU d(\omega t), \quad (2.12)$$

Если этот интеграл разбить на участки, соответствующие интервалам, когда разряд в промежутке есть и когда его нет, и на каждом участке использовать свои уравнения для напряжения и тока, то можно получить уравнение для активной мощности вида

$$P = U_{\text{г оп}} \left[\frac{2 \cdot (U_0 - U_{\text{г оп}}) C_{\text{б}} \omega}{\pi} - \frac{2 \cdot U_{\text{г}} \omega C_{\text{г}}}{\pi} \right], \quad (2.13)$$

где первое слагаемое в квадратных скобках соответствует среднему току через озонатор при горении разряда, а второе слагаемое - среднему току в момент зажигания разряда, когда напряжение на промежутке становится равным пробивному. С небольшой погрешностью это напряжение можно считать равным напряжению горения разряда. Ток, соответствующий этому напряжению, называют критическим.

Тогда уравнение для мощности приобретает вид

$$P = U_{гор} (I_{ср} - I_{кр}) , \quad (2.14)$$

Это уравнение используется для определения мощности при построении вольт-амперной характеристики. Этот метод использован и в данной работе.

Метод состоит в том, что измеряют выпрямленный ток через озонатор при изменении напряжения, приложенного к электродам, и строят вольт-амперную характеристику $I = f(U)$. До начала разряда эта характеристика имеет вид прямой с наклоном, обусловленным сопротивлением всего озонатора (рис. 2.5). После зажигания разряда ток определяется в основном емкостью барьера, и наклон прямой меняется. Точка излома соответствует критическому режиму, при котором ток равен $I_{кр}$. Если продлить разрядную часть вольт-амперной характеристики до пересечения с осью напряжения, то точка пересечения дает напряжение горения разряда $U_{гор}$.

Зная значения $I_{кр}$ и $U_{гор}$ можно найти мощность для любого значения напряжения по соответствующему значению $I_{ср}$.

Основными параметрами, определяющими эффективность работы барьерного озонатора, являются: напряжение на электродах U ; газовый зазор l (эта величина определяет характер разряда и его интенсивность); диэлектрическая проницаемость материала барьера ϵ_0 ; частота f действующего напряже

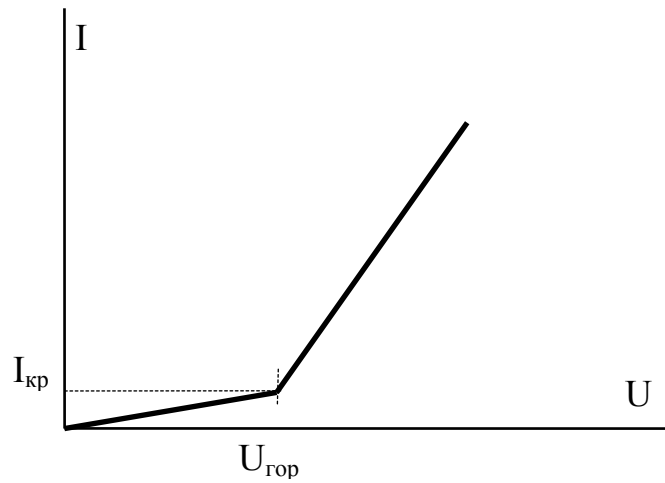


Рис. 2.5 Вольт - амперная характеристика озонатора

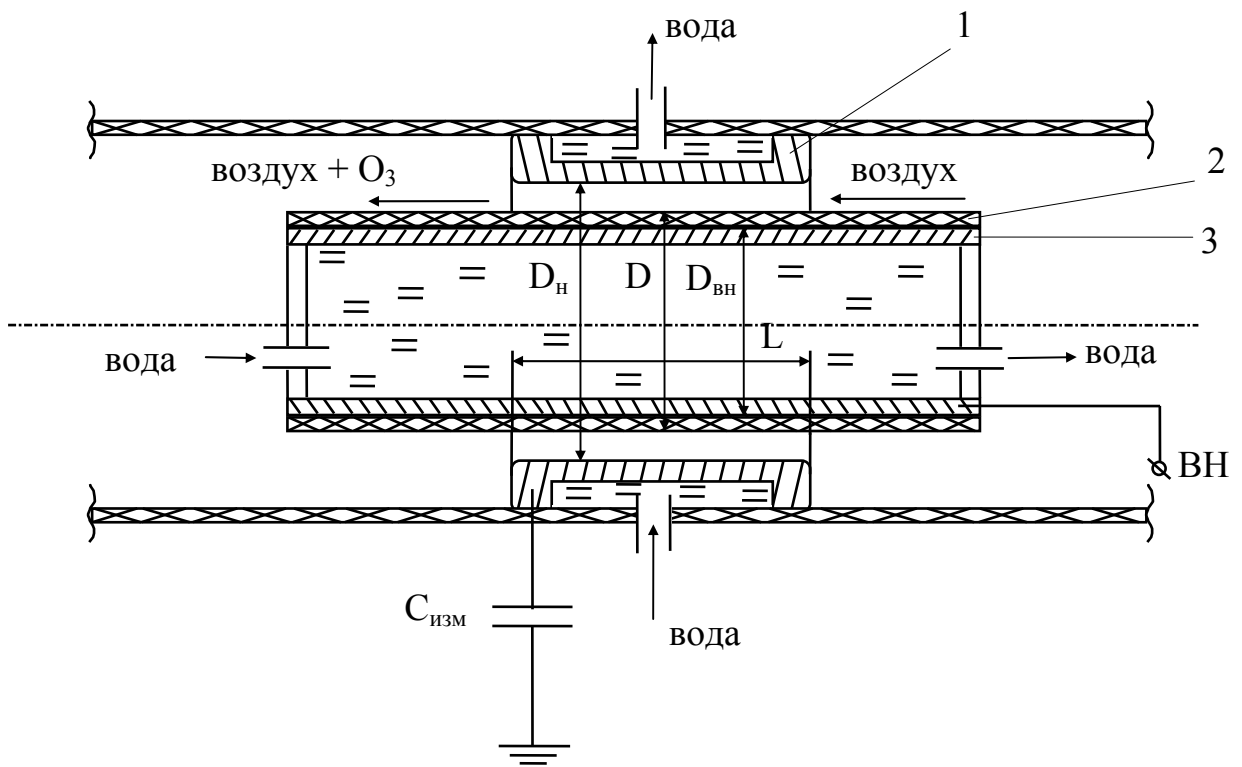


Рис. 2.6 Трубочатый барьерный озонатор

1 - наружный электрод; 2 - барьер из стеклоэмали; 3 - внутренний электрод.

ния и расход газа V_G , определяющий концентрацию озона в выходящей из озонатора газовой смеси .

Для выноса образовавшегося озона из разрядного промежутка необходимо создать равномерный поток газа через разрядную зону. Наиболее удобно это осуществляется в коаксиальной системе электродов так называемого трубчатого озонатора (рис. 2.6).

От скорости протекания газа через озонатор, или от расхода газа V_G (л/мин) зависит время пребывания каждого единичного объема газа в зоне разряда. Это означает, что число разрядов, развивающихся в каждом единичном объеме газа при движении его вдоль озонатора зависит от U_G , т.е. концентрация озона на выходе из озонатора зависит от расхода газа.

С расходом газа связана производительность озонатора

$$G = C_{O_3} \cdot V_G, \quad (2.15)$$

Измеряемая в граммах (или килограммах) озона в час и являющаяся основной характеристикой озонатора.

Второй важной величиной, определяющей эффективность работы озонатора, являются затраты энергии на получение озона

$$W = \frac{P}{G}, \text{ кВт.ч/кг,}$$

Эта величина имеет особо важное значение для промышленных озонаторов с производительностью до 50 - 60 кг/час.

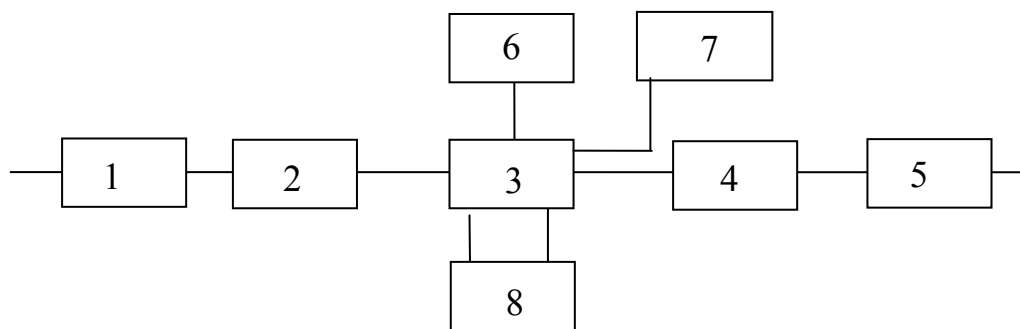


Рис. 2.7 Блок - схема установки

1 - компрессор; 2 - осушитель воздуха; 3 - озонатор; 4 - измеритель концентрации O_3 ; 5 - разложитель озона; 6 - источник высокого напряжения; 7 - блок электрических измерений; 8 - водяное охлаждение.

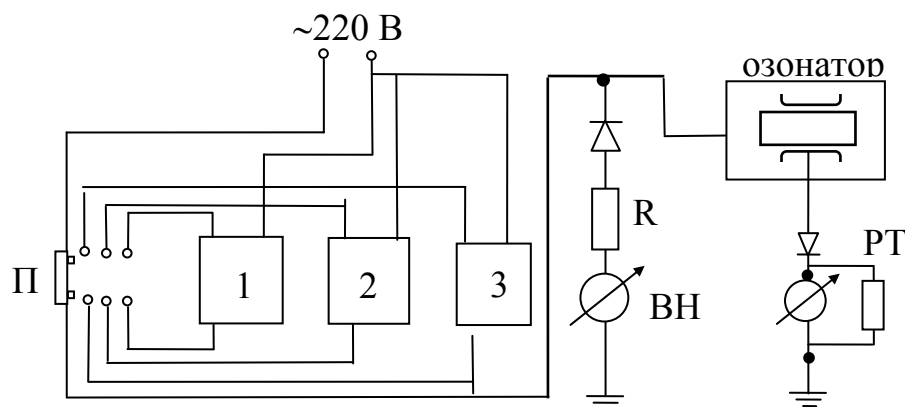


Рис. 2.8 Электрическая схема измерений и коммутации источников питания

1 - ИП - 600 Гц; 2 - ИП - 1000 Гц; 3 - ИП - 1500 Гц.

3. Описание установки

На рис. 2.7 представлена блочная схема установки, включающая, помимо электрической части вспомогательные устройства для осушки газа, водяного охлаждения, компрессор, разложитель озона и измеритель концентрации озона. Измерение концентрации озона осуществляется по спектру поглощения при пропускании света ртутной лампы через специальную кварцевую кювету, внутри которой проходит поток газа с озоном. Выходным прибором измерителя концентрации служит микроамперметр, пересчет показаний которого дает значение концентрации озона. Вся шкала прибора (100 делений) соответствует концентрации озона в газе 20 мг/л или примерно 1 % объемный.

Осушка газа осуществляется пропусканием воздуха через осушитель с силикагелем. Расход газа измеряется ротаметром в делениях, пересчитываемых затем в л/мин.

Для уничтожения озона в выходящем из озонатора потоке газа, что необходимо в целях безопасности для предотвращения отравления (озон является мощным окислителем, и вдыхание воздуха с высокой концентрацией озона приводит к ожогу дыхательных путей) используется разложитель с цианитом, при взаимодействии с которым происходит разложение озона.

Электрическая схема установки приведена на рис. 2.8 , где 1, 2 и 3 - источники питания с частотой 500, 1000 и 1500 Гц соответственно; ВН - блок измерения высокого напряжения; РТ - блок измерения разрядного тока; П - переключатель источников питания.

Измерение высокого напряжения осуществляется по выпрямленному току через добавочное сопротивление $R=27$ мОм. Шкала прибора, установленного на пульте, отградуирована в максимальных значениях напряжения соответствующей частоты.

Измерение тока через озонатор производится с помощью выпрямительной схемы, последовательно с которой включен микроамперметр М-906 с шун-

том. Для определения тока необходимо показание N прибора (мкА) умножить на коэффициент $K_I = 0.168$, имеющее размерность мА/мкА, тогда значение тока $I = N \cdot K_I$ имеет размерность мА.

В работе используется трубчатый барьерный озонатор с диэлектрическим барьером из эмали типа 13 ДЗ, имеющей значение диэлектрической проницаемости $\epsilon_6 = 6$. Диаметр наружного электрода $D_H = 43$ мм, диаметр внутреннего, покрытого эмалью электрода $D = 40$ мм, что дает длину воздушного зазора $l = 1.5$ мм. Толщина слоя эмали 1 мм. Длина наружного электрода 4 см длина рабочей части, где горит разряд, 3.5 см.

4. Задание на предварительную подготовку

1. Ознакомиться с данным описанием.

2. Рассчитать максимальное значение переменного напряжения на электродах озонатора, при котором произойдет пробой промежутка. Озонатор представляет собой коаксиальную систему электродов с диаметром электродов $D_H = 43$ мм и $D = 40$ мм; это создает промежуток длиной 1.5 мм. Электрическое поле в воздушном промежутке можно считать однородным. Для такого поля максимальное значение пробивного напряжения в кВ,

$$U_{\text{пр}} = 24.5 \cdot \delta l + 6.4 \sqrt{\delta l}, \quad (2.16)$$

где δ - относительная плотность воздуха; l - расстояние между электродами, см.

3. Рассчитать энергозатраты на получение озона в следующем режиме работы озонатора: объемный расход газа 1 л/мин, концентрация озона $C_{O_3} = 20$ г/м³, активная мощность разряда $P = 15$ Вт.

5. Задание на проведение работы

Внимание! Первое включение установки на высокое напряжение и переключение с одной частоты на другую осуществляется только преподавателем!

1. Убедиться в том, что установка готова к работе: на пульт подано напряжение и горит сигнальная лампа Л1, включен компрессор и ротаметр, показывает расход воздуха 40 делений, что соответствует 1 л/мин, включено водяное охлаждение озонатора, включен измеритель концентрации озона и его выходной прибор показывает "0".

2. Убедиться в том, что переключатель источников питания находится в положении 1000 Гц, закрыта дверца на левой боковой панели пульта, горит сигнальная лампа источника 1000 Гц, его переключатель напряжения П1 находится в крайнем левом положении, включен рубильник "видимого разрыва" на правой боковой панели пульта.

Включить кнопку "ВКЛ" магнитного пускателя. На пульте загорается лампа Л2 "высокое напряжение". Установка готова к работе.

3. Записать значение тока через озонатор и напряжения при первом положении переключателя П2. Убедиться в том, что концентрация озона равна "0". Поставить переключатель в положение 2, записать значения напряжения и тока и проверить значение концентрации озона. Если концентрация начала расти, убедиться в наличии разряда, посмотрев в торец озонатора через окошко на пульте. Выждать, пока не установится неизменное значение концентрации (примерно 1 мин.) и записать его.

4. Повторить п.3 переключив переключатель П2 в положение 3, 4, 5. При каждом напряжении записывать значения концентрации озона после того, как показания микроамперметра М1 перестанут изменяться. Записать значения тока и напряжения при каждом положении переключателя.

5. Для одного из значений напряжения (например в 4-ом положении переключателя) изменить расход газа и убедиться, что происходит изменение

концентрации озона. Записать значение расхода газа и соответствующее значение концентрации озона.

6. Перевести переключатель П2 в первое положение и нажать кнопку "ВЫКЛ". Высокое напряжение отключается от озонатора.

7. Выключить рубильник "видимого разрыва", и перейти к работе с источником 600 Гц.

После подключения источника 600 Гц включить "видимый разрыв". Включить кнопку высокого напряжения. Повторить измерения по пункту 4 в положениях 1, 2, 3 переключателя П1.

8. Повторить пункты 5 и 6 задания для частоты 1500 Гц.

9. По найденным значениям токов и напряжений для частоты 1000 Гц построить кривую $I_{\text{ср}} = f(U)$ в виде двух пересекающихся прямых. Найти значения $I_{\text{кр}}$ и $U_{\text{гор}}$. С помощью полученной кривой рассчитать значения активной мощности разряда и построить кривую зависимости концентрации озона от мощности разряда.

10. Для одного значения напряжения на озонаторе построить кривую зависимости концентрации озона от частоты напряжения.

11. Для частоты 1000 Гц, расхода газа 1 л/мин и максимального напряжения рассчитать производительность озонатора и затраты энергии на получение озона. Оценить полученные результаты.

5. Контрольные вопросы

1. Как объясняется увеличение выхода озона с ростом приложенного к озонатору напряжения? При каких условиях рост выхода озона прекращается?

2. Почему растет выход озона с частотой приложенного напряжения?

3. Что такое напряжение горения разряда?

4. Какие основные величины характеризуют работу озонатора?