

УСТРОЙСТВО И РАБОТА ВЫСОКОРЕСУРСНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ОЗОНА

Пичугин Ю.П.¹, Филиппов В.Г.², Перунов А.А.², Зеленов В.Е.², Андреев В.В.¹,
Ильин В.В.¹, Назаров Ю.А.²

¹*Чувашский государственный университет, г. Чебоксары*

²*ЗАО "ОЭП ВЭИ" г. Истра, Московская обл.*

Рассмотрены разработки в области озонаторостроения, обеспечивающие высокий ресурс работы генераторов озона.

1. Введение

В последние десятилетия за рубежом и в России проведены работы по совершенствованию озонаторного оборудования. Созданы озонаторные установки высокой производительности - высокочастотные озонаторы на основе барьерного разряда [1]. Однако, создание таких установок еще более обострило проблему ресурса: чаще стал выход из строя озонаторных камер. Так как озон является одним из сильнейших окислителей, то в озонаторной камере происходит интенсивный износ ее элементов. Как правило, первым из строя выходит диэлектрический барьер, наиболее уязвимый участок озонаторной камеры. Кроме воздействия озона, барьер испытывает разрушения, обусловленные как микроразрядами, так и непосредственно электрическим полем. Совместное воздействие этих факторов приводит к выходу из строя диэлектрического барьера, в итоге к короткому замыканию между электродами озонаторной камеры. Вопрос состоит в том, насколько быстро произойдет разрушение барьера. Очевидно, если разряд в озонаторе устойчиво однородный и параметры барьера (материал, его качество, геометрия и размеры барьера) подобраны правильно, то барьер будет работать практически неограниченно долго. Это следует из однородности разряда. Согласно [1] микроразряды одной серии равномерно распределяются в разрядном промежутке. Причем расположение микроразрядов предыдущей серии отличается от расположения микроразрядов последующей серии. Имеет место так называемое стохастическое распределение микроразрядов в межэлектродном пространстве. Однако, при наличии какого-либо возмущающего фактора однородность разряда нарушается, и начинается интенсивное разрушение диэлектрического барьера.

Несмотря на важность этого вопроса литература, относящаяся к нему, очень бедна. В большинстве работ констатируется только факт самого разрушения барьера. Отсутствие анализа причин приводит к одному на первый взгляд очевидному пути решения данной проблемы: использование новых материалов для диэлектрического барьера (стеклоэмаль, керамика и т.д.). До некоторой степени использование новых материалов позволяет повысить надежность и ресурс озонаторных камер, но кардинально вопрос не решается. В работе [2] по анализу состояния производства озонаторного оборудования на 1997г. сделан вывод: " в России сейчас нет организации, продукция которой полностью удовлетворила бы всем требованиям к озонаторному оборудованию, включая и высокую степень надежности". Очевидно, такие же проблемы характерны и для озонаторного оборудования зарубежных фирм.

Большое влияние на однородность разряда оказывает равенность диэлектрика и электродов, а для озонаторов трубчатого типа - цилиндричность и соосность коаксиальных элементов, образующих разрядную камеру озонатора. Для пластинчатых озонаторов необходимо выдерживать жесткие допуски на параллельность. В [3,4] предлагаются решения подобных вопросов. Однако, как показывает практическая деятельность, даже при идеальных решениях устойчивость барьерного разряда нельзя гарантировать. Безысходность такого положения дел можно частично решить за счет автоматического отключения элементов с пробитыми барьерами и быстрой их заменой. Такие решения предлагаются в [3,5,6].

Таким образом, до настоящего времени отсутствовали принципиальные решения, позволяющие если не полностью ликвидировать разрушение барьера, то, по крайней мере, значительно увеличить срок его службы.

С целью принятия кардинальных решений по продлению срока службы диэлектрического барьера был проведен анализ причин разрушения барьера.

Одной из распространенных причин выхода из строя барьера является его неравномерный нагрев. В зоне разряда температура барьера достигает $80\div 100^{\circ}\text{C}$, а на краях, необходимых для предотвращения перекрытия разрядного промежутка, температура не превышает 40°C . В результате возникают значительные термические и механические напряжения, способные вызвать механические разрушения. Естественно, после механического разрушения следует электрический пробой и, соответственно, выход озонатора из строя. Таким разрушениям подвержены барьеры, выполненные из стекла, стеклоэмали, керамики, т.е. из хрупких материалов. Такая причина относительно легко устраняется, если выполнить барьер из материала, обеспечивающего высокую прочность

и трещиностойкость в условиях резких температурных градиентов, свойственных рабочему режиму озонаторов (например: винипласт, стеклотекстолит, гетинакс и т.д.).

Другая и, надо отметить, основная причина разрушения барьера - нарушение однородности барьерного разряда. На фоне равномерного свечения можно визуальнo наблюдать отдельные узкие каналы. Они выделяются своей яркостью и неподвижны в пространстве. Такие обособленные каналные микрозаряды длительно воздействуют локально на поверхность барьера, приводя его к разрушению. Можно предположить, что разрушение барьера аналогично эрозии изолятора от частичных зарядов. Первоначально происходит эрозия поверхности барьера под воздействием концентрированного разряда, образуя углубления. В дальнейшем эти впадины подвергаются процессу разрушения с возрастающей скоростью, пока глубина не достигнет критической глубины. Окончательный выход из строя барьера завершается электрическим пробоем.

Одной из причин, приводящей к локализации микрозарядов может быть недостаточная компенсация электрического поля вблизи поверхности барьера зарядами от предыдущих микрозарядов. Недостаточность компенсации можно объяснить двумя факторами: увеличением напряженности электрического поля в разрядном промежутке и повышенной поверхностной проводимостью барьера. Увеличение напряженности поля либо связано с большими отклонениями от соосности или параллельности элементов разрядной камер, либо с поверхностными искажениями поля, как барьера, так и металлических электродов. Искажения поля обусловлены различными причинами: наличием острых кромок, углов, заусенцев, отложениями различных загрязнений и т.д. А местное увеличение поверхностной проводимости барьера также связано с отложениями в виде токопроводящей пыли, капель различных жидкостей. На поверхности барьера образуются пятна с повышенной проводимостью. Такие пятна возникают как за счет влажности, загрязненности обрабатываемого газа, так и за счет продуктов сопровождающих синтез озона. Указанные пятна обладают повышенной емкостью с электродом, который расположен по другую сторону барьера. В итоге с другого электрода на пятне происходит разряд. Чем больше площадь пятна и соответственно выше его емкость, тем интенсивней разряд. Место разряда локализуется расположением пятна на барьере. Происходит изменение формы разряда. Возможен переход от лавинно-стримерной формы разряда к искровой. Искровой микрозаряд характеризуется более высокими значениями тока, температуры, повышенными поперечными размерами канала, а также низкими значениями падения напряжения на разрядном промежутке. Локализация микрозарядов в этом случае обуславливается опорными точками искры на электродах, а также плазменными следами в газовом промежутке от серии предыдущих искровых

разрядов. Удалению следов плазмы из центральной части разрядного промежутка способствует принудительное движение газа. В областях, прилежащих к поверхности электродов, движение газа практически отсутствует, и плазменные следы только частично разрушаются за счет процессов диффузии и деионизации. Барьер при искровой форме разряда подвергается более интенсивному разрушению.

В связи с этим большое значение приобретает предварительная подготовка воздуха, включающая в себя очистку и осушку. Даже незначительная загрязненность и влажность озонируемого газа приводят к постепенному накоплению отложений на поверхности барьера и, в конечном итоге, к выходу его из строя. Процесс загрязнения внутренней поверхности озонаторной камеры становится более интенсивным и за счет побочных продуктов, сопровождающих синтез озона, количество которых напрямую связано с качеством подготовки озонируемого газа.

Кроме электрической эрозии, при определенных условиях возможен чисто электрический пробой барьера по всей его толщине. Действительно, если рабочее напряжение озонатора больше электрической прочности барьера, и произойдет переход к искровой форме разряда, то из-за низкого значения падения напряжения на искровом микроразряде практически все напряжение будет приложено к барьеру. Вследствие электрического пробоя барьер выйдет из строя.

Переход микроразрядов к искровой форме определяется совокупностью различных факторов. Это состояние озонируемого газа (температура, давление), его состав, качество (запыленность, влажность) и высокие удельные электрические нагрузки (плотность тока, напряженность поля в разрядном промежутке).

Проведенный анализ показывает многообразие причин, приводящих к нарушению однородности барьерного разряда, локализации микроразряда. В итоге к быстрому износу и разрушению диэлектрического барьера. Механизм разрушения барьера вследствие электрической эрозии и электрического пробоя говорит о том, что за счет материала барьера значительно продлить срок его службы невозможно. Необходимо искать другие пути решения для повышения ресурса работы озонаторных установок.

2. Безбарьерные и барьерные озонаторы.

Как показывает вышеприведенный анализ, практическое применение озонаторов на барьерном разряде приведет к большим затруднениям. В связи с этим возникает решение: использовать безбарьерные озонаторы. Известны два вида безбарьерных озонаторов, работающих на электрическом разряде. Это коронные озонаторы [7,8] и озонаторы на искровом разряде [9,10].

Известно, что коронные озонаторы работают с низкой концентрацией озона менее 1 г/м^3 , и в лучшем случае могут быть использованы только для обработки воздушной среды. В работе [8] представлены результаты по работе генераторов озона на основе импульсного коронного разряда. Отмечается повышение концентрации озона до 5 г/м^3 . Однако, представленные результаты имеют спорный характер, причем реализация таких источников питания сложна и в настоящее время практически невозможна.

В патентной литературе [9] описаны безбарьерные озонаторы, работающие на искровом разряде. Такие озонаторы состоят рис.1 из двух электродов, один сплошной, а другой секционированный, причем каждая секция подключается к источнику питания через балластную нагрузку. В качестве балластной нагрузки используются либо конденсаторы, либо резисторы. В последнем случае генератор озона может работать и от постоянного напряжения. Представленные результаты для таких озонаторов [9] показывают, что заметная производительность по озону наблюдается при очень высоких скоростях озонируемого газа, т.е. при низкой концентрации озона. С целью повышения концентрации озона был проведен ряд экспериментов с безбарьерным озонатором. Предполагалось, что неэффективность работы озонаторов обусловлена различием по параметрам отдельных микрозарядов барьерного разряда и безбарьерного.

В процессе эксперимента рис.1 варьировались значения емкости балластной нагрузки от $C=0,5\text{ пФ}$ до $C=2\text{ пФ}$, что примерно должно соответствовать барьерной емкости отдельного микрозаряда в барьерном озонаторе. При этом также изменялись как высота газоразрядного зазора от 1 мм до 3 мм, так и число секций секционированного электрода от 60 до 300 штук.

На рис. 1 схематично приведено это устройство. Из основных элементов озонатор включает в себя секционированный вдоль и поперек потока газа электрод 6 и общий электрод 1, последовательно подключенную к каждому элементу секционированного электрода балластную емкостную нагрузку 10.

При использовании в качестве озонируемого газа воздуха во всех без исключения случаях была зафиксирована очень низкая концентрация озона не более $0,5\text{ г/м}^3$. Такие показания лимитированы чувствительностью озонатора. В то же время при внесении диэлектрического барьера в зону 2 рис.1 синтез озона резко активизировался и концентрация его повысилась вплоть до 6 г/м^3 .

Таким образом, результаты экспериментов показали, что для эффективной работы электрических озонаторов необходимо использовать барьерный разряд.

В связи с этим был разработан и получен патент [10] на генератор озона, в основу которого была положена схема рис.1.

Озонатор работает следующим образом. Кислородосодержащий газ поступает в зазор между электродами 1 и 6, которые подключены к высоковольтному источнику переменного напряжения.

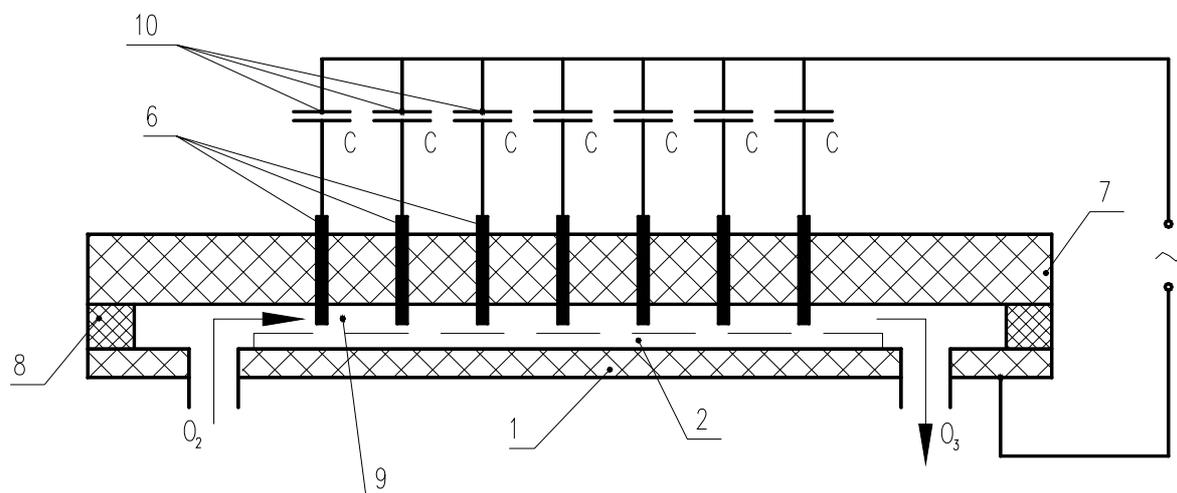


Рис.1. Электромонтажная схема безбарьерного озонатора

1 - металлический электрод; 2 - зона возможного расположения диэлектрического барьера; 6 - секционированный электрод; 7 - стенка из оргстекла; 8 - вкладыши; 9 - разрядный зазор; 10 - балластная нагрузка

В межэлектродном зазоре зажигается разряд, состоящий из отдельных серий множества единичных разрядов. Такой характер разряда обеспечивается как балластной емкостной нагрузкой 10, так и диэлектрическим барьером 2. Кроме этого, диэлектрический барьер 2 формирует расширенную часть канала каждого микроразряда, которая является наиболее производительной по озону. Действительно, температура расширенной части канала микроразряда, прилегающей к диэлектрическому барьеру, значительно меньше остальной части канала. При синтезе озона в электрическом разряде, часть озона за счет высокой температуры успевает разложиться. Чем ниже температура канала микроразряда, тем выше производительность озонатора. В предлагаемом устройстве за счет низкотемпературной части канала, прилегающей к диэлектрическому барьеру, производительность по озону возрастает. С другой стороны в предлагаемом устройстве, как и в классическом озонаторе, возможен электрический пробой барьера. Однако в предлагаемом устройстве за счет секционированности электрода 6 по месту пробоя

барьера образуется микроразряд, ограниченный по току за счет балластной емкости C . Параметры этого микроразряда аналогичны микроразряду в безбарьерном озонаторе, т.е. он менее производителен по озону. Остальные микроразряды продолжают работу в прежнем наиболее производительном режиме. Таким образом, можно продолжать эксплуатацию озонатора. В дальнейшем возможен еще ряд пробоев диэлектрического барьера, вызывающих снижение производительности по озону, но не приводящих к короткому замыканию, т.е. к отключению озонатора.

Срок службы предлагаемого озонатора значительно продлевается. Однако стабильность режима работы данного озонатора обеспечивается только при достаточном расстоянии между секциями секционированного генератора. В противном случае в зону пробоя барьера устремляются микроразряды соседних секций и процесс может принять лавинообразный характер. Практическое использование подобных озонаторов показало, что нормальный режим имеет место при расстояниях между секциями не менее 15 мм. В итоге камеры генераторов озона имеют завышенные габариты.

В результате проведенных экспериментов [11] было выявлено, что наиболее производительной по озону является часть канала микроразряда, прилегающего к барьеру. Это предполагает, что при создании высокопроизводительного озонатора необходимо обеспечить как можно больше таких частей в единице разрядного объема. Одним из вариантов такого решения является использование многобарьерного разрядного промежутка. Многобарьерный озонатор представлен на рис.2.

Представляемое устройство относится к пластинчатым озонаторам. Очевидно, все преимущества будут справедливы и для трубчатого озонатора. Устройство выполнено в виде пакета, состоящего из двух металлических электродов (1). Между ними располагаются диэлектрические барьеры 2. Между барьерами размещены вкладыши 8, предназначенные для равномерности газовых зазоров 9, которые необходимы для прохода озонируемого газа. На рис.2 изображен случай исполнения устройства с четырьмя барьерами и тремя газоразрядными зазорами.

Устройство работает следующим образом. При подаче электрического напряжения на электроды (1) возникает электрическое поле с барьерным разрядом в каждом разрядном промежутке. Электрическое поле равномерно распределяется по зазорам (9). Озонируемый газ подается в эти зазоры, где озонируется под действием барьерного разряда.

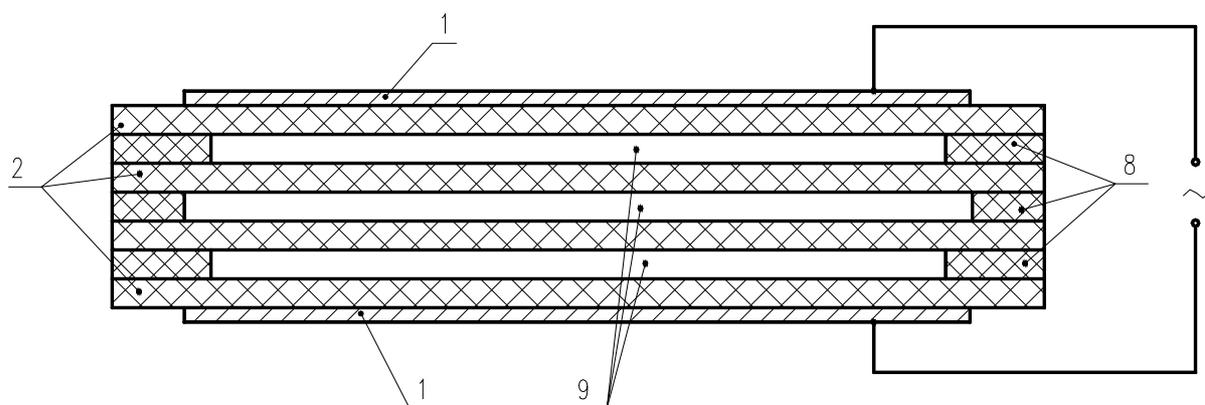


Рис.2. Электромонтажная схема многобарьерного озонатора

1 - металлические электроды; 2 - диэлектрические барьеры; 8 - вкладыши; 9 - разрядные зазоры

В лабораторных условиях были проведены экспериментальные исследования по эффективности предлагаемого устройства. За основу были взяты пластинчатый однобарьерный озонатор и предлагаемое многобарьерное устройство. Классический озонатор со следующими данными: барьер из стеклотекстолита толщиной 2 мм и газоразрядный промежуток высотой 1,5 мм. Предлагаемое устройство имеет четыре барьера из стеклотекстолита (толщина каждого 0,5 мм) и три зазора (каждый высотой 0,5 мм). Таким образом, озонаторы имели суммарный газоразрядный промежуток равный 1,5 мм и одинаковую суммарную толщину барьеров равную 2 мм. Кроме этого, озонаторы имели одинаковые формы и площади газоразрядных промежутков. При питании озонаторов от высоковольтного источника напряжения частотой 50 Гц поддерживались одинаковые средние токи (1 мА) и действующие напряжения (11 кВ). Классический озонатор показал производительность 0,3 грамма озона в час. У четырехбарьерного озонатора производительность повысилась до 1,2 грамма озона в час.

Повышение производительности четырехбарьерного озонатора объясняется двумя причинами. Основная причина: за счет многобарьерности резко увеличилось количество самых производительных по озону зон барьерного разряда, к которым относятся расширенные части каналов микрозарядов, которые прилегают к поверхности диэлектрических барьеров. Чем больше барьеров, тем больше этих зон. Другая причина -

лучшее охлаждение барьеров в многобарьерном озонаторе. Озонируемый газ омывает каждый барьер и осуществляет теплосъем с их поверхностей. Чем больше барьеров, тем эффективнее охлаждение. При малом расходе озонируемого воздуха $Q=0,05 \text{ м}^3/\text{час}$ зафиксирована максимальная концентрация озона $30 \text{ г}/\text{м}^3$.

В результате множества экспериментов однобарьерный озонатор функционировал до пробоя барьера от 3 до 10 часов. Четырехбарьерный озонатор проработал свыше 200 часов и ни один барьер не вышел из строя. Производительный по озону многобарьерный озонатор оказался и высокоресурсным. Данный эффект можно объяснить последовательным расположением и срабатыванием каналов микрозарядов в зазорах. Если в разрядном зазоре, по какой либо причине (увлажнение или загрязнение поверхности барьера) произойдет интенсификация микрозарядов, то она в классическом озонаторе приведет к пробоя барьера. В многобарьерном озонаторе соответствующий заряд в соседнем зазоре ограничивает такую интенсификацию, так как каналы микрозарядов последовательно включены относительно друг друга. Интенсификация заряда будет иметь место, если во всех зазорах одновременно и локально произойдут изменения, приводящие к интенсификации, что маловероятно. Чем больше барьеров (зазоров), тем менее вероятен выход из строя озонатора, т.е. выше его ресурс.

Дальнейшее повышение ресурса возможно, если один из зазоров выполнить герметичным. Тогда полностью исключается загрязнение и увлажнение поверхностей барьеров в этом зазоре. И, соответственно, этот зазор неограниченно долго будет выступать как ограничитель микрозарядов в смежных зазорах. Однако такая герметизация приведет к снижению производительности многобарьерного озонатора.

В практике получения озона в основном используются трубчатые озонаторы. Хотя пластинчатые озонаторы более просты в изготовлении, более дешевые, но из-за краевых эффектов менее надежны. Используя многобарьерный вариант можно избавиться от нежелательных краевых эффектов. На рис.2 представлен такой вариант. Вкладыши 3 выполнены различной ширины. В зазоре с более широкими вкладышами возможна интенсификация разрядных процессов за счет скользящих зарядов по поверхности вкладыша, ограничивающей зазор. Однако, в зазоре с более коротким вкладышем разрядные процессы в этой части озонатора проходят нормальным образом и ограничивают интенсивность скользящих зарядов. Таким образом, проявление краевых эффектов в пластинчатом озонаторе резко ослабляется.

3. Генераторы озона с подвижным барьером.

Одним из путей решения проблем ресурса и надежности работы озонаторных установок является использование подвижных барьеров. Реализация подвижности

возможна при использовании в озонаторной установке барьера с жидким диэлектриком [12]. Предлагаемый метод решает задачу создания озонатора с повышенным сроком службы.

Техническим результатом является непрерывное обновление диэлектрического барьера в процессе работы, которое позволяет решить поставленную задачу.

Технический результат достигается тем, что озонатор, содержащий подключенные к высоковольтному источнику переменного напряжения два электрода, образующие газоразрядный промежуток с расположенным в нем барьером, который выполнен двухслойным, причем один из его слоев выполнен из твердого диэлектрика, а другой представляет собой жидкий диэлектрик, размещенный в емкости, образованной слоем твердого диэлектрика и одним из электродов, при этом емкость подсоединена к замкнутой магистрали, содержащей фильтровальное устройство, насос и теплообменник.

На рис.3 представлено устройство на примере пластинчатого озонатора. Предложенный озонатор содержит два металлических электрода 1 и 2, подключенных к высоковольтному источнику переменного напряжения 6, и образующих газоразрядный промежуток 3, в котором расположен диэлектрический барьер, состоящий из слоя твердого диэлектрика 4 и слоя жидкого диэлектрика, представляющего собой емкость с диэлектрической жидкостью.

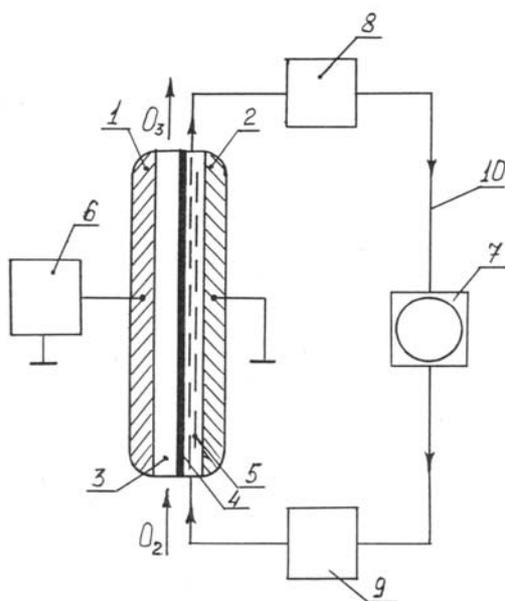


Рис.3. Электромонтажная схема озонатора с двухслойным барьером

1 и 2 - металлические электроды; 3 - газоразрядный промежуток; 4 - твердый слой барьера; 5 - жидкий слой барьера; 6 - источник питания озонатора; 7 - масляный насос; 8 - фильтр; 9 - теплообменник; 10 - магистраль

Емкость с жидким диэлектриком образована твердым диэлектрическим барьером и электродом 2. Причем, жидкий слой 5 прилежит к электроду 2. Емкость с жидким диэлектриком через замкнутую магистраль подсоединена к насосу 7 для обеспечения циркуляции, т.е. обновления жидкого слоя 5 барьера. Кроме этого, в магистраль 10 включены фильтр 8 и теплообменник 9.

Озонатор работает следующим образом. С помощью насоса 7 через магистраль 10 осуществляется непрерывная прокачка диэлектрической жидкости. Переменное напряжение от высоковольтного источника 6 подается на электроды 1 и 2. В зазоре 3 возникает объемно-барьерный электрический разряд. Если в зазор 3 поступает кислородосодержащий газ, то осуществляется синтез озона.

Жидкий диэлектрик, протекая через емкость 5, загрязняется и нагревается. Фильтр 8 и теплообменник 9, включенные в магистраль 10, осуществляют очищение и охлаждение жидкого диэлектрика. В процессе работы озонатора синтез озона осуществляется как в классическом озонаторе с твердым диэлектрическим барьером. Однако, барьер в классическом озонаторе из-за сильного электрического поля подвергается воздействию частичных разрядов, что проявляется в разрушении и изменении физико-химических характеристик, которые сопровождаются выделением газа, увеличением проводимости и $\operatorname{tg} \delta$. Эти процессы при интенсивном протекании завершаются пробоем барьера.

В предлагаемом двухслойном барьере имеют место те же процессы. Но второй слой непрерывно обновляется за счет циркуляции диэлектрической жидкости. Загрязнение жидкого диэлектрика, возникающее под действием частичных разрядов и электрических процессов, устраняется фильтром 8, который устанавливается непосредственно после озонатора перед насосом. В противном случае при накоплении продуктов разрушения диэлектрической жидкости падает ее электрическая прочность. После насоса устанавливается теплообменник 9 и охлажденная диэлектрическая жидкость подается во второй слой барьера. Охлаждение диэлектрической жидкости необходимо с одной стороны, чтобы исключить ее перегрев, а с другой стороны - использовать в качестве хладоохлаждающего агента для охлаждения твердого слоя диэлектрического барьера с целью повышения производительности озонатора. При перегреве жидкого диэлектрика возникает интенсивное газовыделение, что приводит к его электрическому пробоему. С увеличением температуры диэлектрического барьера резко увеличиваются скорости реакций, приводящих к разрушению озона. Это приводит к падению концентрации озона на входе озонатора и, соответственно, к уменьшению его производительности.

При выборе размеров (толщины) слоев барьера необходимо учитывать, чтобы слой с диэлектрической жидкостью обладал достаточной электрической прочностью и выдерживал все напряжение, подключаемое к озонатору. Первый слой из твердого диэлектрика обеспечивает герметизацию и форму второго слоя из жидкого диэлектрика, т.е. первый слой должен иметь необходимую механическую жесткость. С другой стороны он должен быть как можно тоньше для лучшего охлаждения зоны электрического разряда и, соответственно, повышения производительности озонатора. Однако, первый слой барьера интенсивно стареет, но второй слой непрерывно обновляется и выдерживает все напряжение озонатора. Таким образом, исключается электрический пробой барьера.

Устройство на рис.3 предложено на примере пластинчатого озонатора. Очевидно, все выводы и преимущества также справедливы для трубчатого озонатора.

Эффективность предложенного метода была проверена на опытной модели. Эксперименты показали надежность и высокоресурсность двухслойного озонатора, а также его повышенную производительность по озону. Высокая производительность обусловлена очень интенсивным охлаждением жидкого слоя барьера, так как жидкость (конденсаторное масло) очень сильно охлаждается в теплообменнике.

Другой путь решения проблем ресурса и надежности работы озонаторных установок - использование вращающихся барьеров. В работе [13] уже были использованы в качестве вращающихся элементов электроды озонаторной камеры. Однако, широкого распространения такие устройства не получили. Здесь множество причин. Согласно анализу, проведенному в первом разделе: большинство факторов, приводящих к выводу из строя диэлектрического барьера, связаны с самим барьером, как со свойствами материала, так и состоянием его поверхности и поверхностного слоя. Поэтому вращение только электродов не может решить основных вопросов, связанных с работоспособностью озонаторных камер.

На рис.4 представлена принципиальная конструкция с вращающимся барьером [14]. Установка озонирования содержит диэлектрический барьер 1 в форме диска, кольцевые электроды 2 и 3, расположенные по обеим сторонам барьера; высоковольтный источник 4 переменного напряжения, к которому подключены электроды 2 и 3. Диэлектрический барьер 1 приводится во вращение с помощью электродвигателя 5.

Установка работает следующим образом: с помощью электродвигателя, диэлектрический барьер приводится во вращение. Переменное напряжение от высоковольтного источника подается на электроды 2 и 3, при этом в обоих зазорах между диэлектрическим барьером и электродами возникает объемно-барьерный электрический разряд, в котором осуществляется синтез озона. За счет принудительной подачи

озоносодержащего газа, можно обеспечить поступление озона к обрабатываемому объекту.

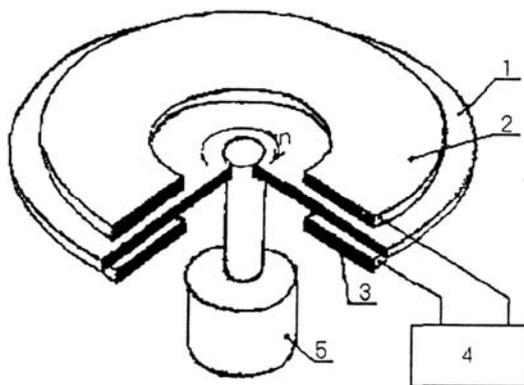


Рис.4

Рассмотрим влияние вращения барьера на процессы в разрядном промежутке озонаторной камеры. Сразу же необходимо отметить, что вращение на развитие отдельного микрозаряда не должно оказывать существенного влияния в виду малого времени его существования (~ 10 нс). за это время перемещение диэлектрического барьера ничтожно. А за время между сериями микрозарядов перемещение значительно. Так при частоте питающего напряжения равной 50 Гц, время между сериями $\Delta t \sim 10^{-3}$ с. Тогда при линейной скорости $v=10$ м/с получим перемещение $\Delta s = v \Delta t = 10^{-2}$ м = 10 мм, что больше длины разрядного промежутка. При таком перемещении за время между сериями произойдет смещение приповерхностных зон горения микрозарядов. В последующей серии распределение микрозарядов в разрядном промежутке должно значительно отличаться от неподвижной системы. Таким образом, вращение барьера должно оказывать сильное влияние на начальную стадию развития серии микрозарядов (момент возникновения микрозарядов, место формирования и форму разряда) и отсутствие влияния на дальнейшую стадию развития лавинно-стримерного микрозаряда.

Препятствует образованию локализации разрядных процессов и взаимное перемешивание объектов на поверхностях барьера и электродов, способствующих локализации (острые кромки, углы, заусенцы, опорные пятна и плазменные следы предыдущих разрядов). Если инициатором локализации разрядных процессов является неподвижный металлический электрод, то разрушающее воздействие локализационного микрозаряда на движущийся барьер практически не сказывается. Точечное разрушение переходит на всю длину окружности вращающегося барьера. В данном случае, когда инициатором локализации разрядных процессов выступает барьер, его вращение приводит либо к полному устранению локализации, либо к расширению границ электрических нагрузок, вызывающих такое влияние. Этому способствует турбулизация

движения газа в зонах, прилежащих к поверхностям вращающегося барьера. Для возникновения турбулентности газовых потоков необходимы как большие скорости вращения барьера (десятки метров в секунду), так и значительные центробежные силы. Большое влияние центробежные силы оказывают и на состояние поверхности диэлектрического барьера. Под их действием происходит самоочищение от загрязнений, поступающих с озонируемым газом, и отходов озонирования. Последний фактор является одной из причин, препятствующих реализации так называемого трубчатого озонатора с вращающимся барьером в форме цилиндра. Здесь удалению отходов препятствует замкнутость пространства разрядного промежутка.

Таким образом, вращение барьера частично, а в отдельных случаях полностью устраняет факторы, способствующие локализации разрядных процессов, которая в итоге приводит к разрушению барьера и выходу из строя озонаторных камер. Следовательно, вращение барьера приводит к увеличению ресурса озонаторов и повышению надежности их работы.

При разработке озонаторов был принят ряд принципиальных решений: повышение производительности достигается за счет применения нескольких вращающихся на одном валу барьеров; подача озонируемого газа (воздуха) осуществляется через полый вал; подшипники вала располагаются вне озонаторной камеры и их герметичность обеспечивается с помощью сальниковых узлов. В герметичных установках использовалось водяное охлаждение. В одном случае охлаждается корпус, в другом непосредственно электроды. Применялась грубая подготовка воздуха: фильтрование и частичная осушка.

Уникальной особенностью озонаторов с вращающимся барьером является возможность использования в качестве источника питания высоковольтного генератора постоянного напряжения [15,16]. С этой целью перестраивается система металлических электродов. На рис.5 приведена схема конструкции установки озонирования, питающегося от постоянного напряжения. Установка озонирования содержит диэлектрический барьер 1 в форме диска, электроды 2 и 3, расположенные по обеим сторонам барьера 1 и образующие между собой пары противоположных электродов (количество пар - четное число, на рис.5 число пар равно четырем), высоковольтный источник 4 постоянного напряжения, к которому подключены пары электродов 2 и 3. Причем каждая последующая пара подключена с чередующей полярностью к источнику 4 постоянного напряжения.

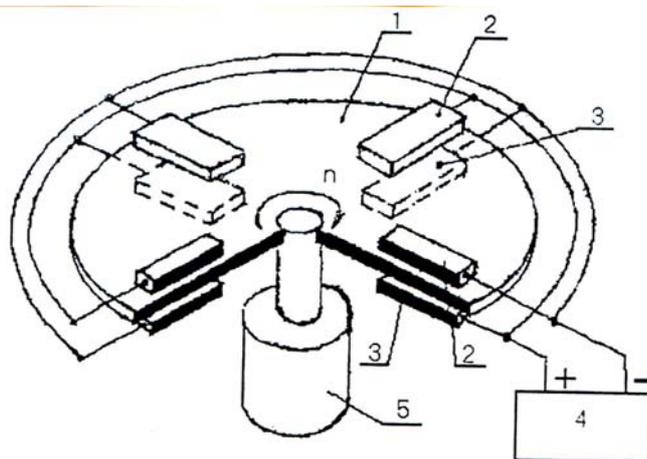


Рис.5

Установка работает следующим образом. Постоянное напряжение от высоковольтного источника подается с чередующейся полярностью на каждую из пар частичных электродов 2 и 3. Возникает объемно-поверхностный барьерный разряд, в котором осуществляется синтез озона. Длительность разряда при неподвижном диске ограничена как процессом заряда емкости части диэлектрического барьера, которая определяется толщиной барьера, его диэлектрической проницаемостью и площадью разряда, так и напряжением горения. По мере зарядки емкости напряжение в области разряда падает, становится меньше напряжения горения и разряд прекращается.

Для вращающегося с помощью электродвигателя диэлектрического барьера со скоростью "n" электрический разряд, в котором происходит синтез, становится непрерывным. Из-за чередующейся полярности подключения высоковольтного источника к парам электродов осуществляется непрерывная перезарядка емкостей. К очередной паре подходит заряд на поверхности диэлектрического барьера, который остается от перезарядки емкостей предыдущей парой электродов. Полярность такого заряда определяется предыдущей парой электродов и противоположна полярности приложенного напряжения к последующей паре, что создает самые благоприятные условия для горения и поддержания барьерного разряда. Таким образом, процесс непрерывно повторяется от одной пары электродов к другой.

В предлагаемом устройстве каждая пара электродов 2 и 3 выполняет двойную функцию: в первом случае как объект синтеза озона, во втором как перезарядное устройство.

Выход озона пропорционален количеству разрядных областей, т.е. числу пар электродов 2 и 3. Увеличивая число пар электродов и скорость вращения "n", можно достичь производительности по озону соизмеримой с производительностью

высокочастотных озонаторов. Однако, число пар лимитируется как размерами диэлектрического барьера, так электрической прочностью между соседними парами.

4. Генераторы озона на поверхностном разряде.

При реализации способа синтеза озона с помощью вращающегося барьера при питании от источника постоянного напряжения впервые представилась возможность экспериментального изучения униполярного барьерного разряда. Ранее барьерный разряд создавался только в переменном электрическом поле. Униполярность позволила в более чистом виде экспериментально наблюдать и изучать барьерный разряд. В этом случае картина барьерного разряда не искажается как при питании от переменного напряжения. При переменном напряжении предыдущий разряд одной полярности оказывает влияние на картину последующего разряда другой полярности.

В результате проведенных экспериментов с одной стороны была подтверждена структура барьерного разряда [11], а с другой выявлены причины такой структуры. Действительно, каждый микрозаряд состоит из трех зон: приэлектродная зона, прилегающая к металлическому электроду, столб микрозаряда и прибарьерная расширенная зона. Длина столба определяется как зарядным зазором, так и пятнами на металлическом электроде. Столб является самой высокотемпературной частью микрозаряда и поэтому отрицательно влияет на синтез озона, а также способствует разрушению диэлектрического барьера. Естественно, необходимы такие озонаторные камеры, в которых осуществляется барьерный разряд с минимальной длиной столбов микрозарядов. Такие устройства широко известны. Это генераторы озона на поверхностном разряде [17,18]. За счет расположения индуцирующего и зарядных электродов непосредственно на поверхности барьера обеспечивается минимальная длина газоразрядного промежутка и соответственно длина столба микрозаряда. Однако в таких устройствах не вся поверхность диэлектрического барьера участвует в синтезе озона. Между зарядными электродами располагаются темновые зоны [18], в которых отсутствуют электроразрядные процессы. Темновые зоны можно устранить, если зарядные электроды выполнить в виде электропроводящего гофра рис.6. Причем ребра одной стороны гофра расположены на поверхности диэлектрического барьера.

При выполнении гофрированного электрода симметричным для дальнейшего повышения эффективности озонобразования устройство снабжено дополнительным барьером, прилегающим к ребрам гофра с другой стороны от основного барьера, и дополнительным индуцирующим электродом, прилегающим к дополнительному барьеру.

При использовании предлагаемого способа и устройства для синтеза озона одновременно используются оба вида разряда: поверхностно-барьерный и барьерный с газовым промежутком. Первый разряд горит на поверхности барьера в зоне, прилегающей к разрядным электродам (ребрам гофрированного электрода), а другой - в газовом промежутке между темновой зоной барьера, где отсутствует поверхностно-барьерный разряд, и частями поверхности гофрированного электрода, расположенными над темновой зоной. Таким образом, активная площадь поверхности барьера увеличивается, что приводит к повышению производства озона.

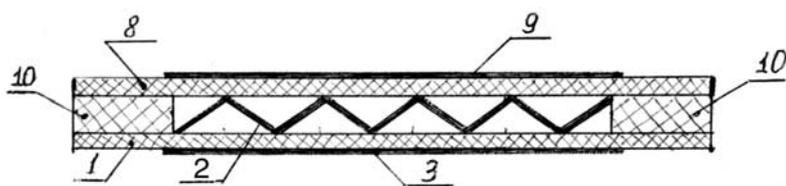


Рис.6

Устройство для получения озона рис.6 содержит основной диэлектрический барьер 1, с одной стороны которого расположены разрядные электроды, выполненные в виде электропроводящего листа 7, на другой стороне барьера 1 расположен сплошной индуцирующий электрод 4. При этом ребра гофрированного электрода 7 выполняют функции разрядных электродов. Возможны и другие варианты исполнения разрядного электрода 7. Однако, гофрированный легко реализуем (штамповка, прокатка электропроводящего листового материала) и позволяет практически при тех же габаритах повысить производительность озонатора за счет дополнительных барьера 8 и индуцирующего электрода 9. Дополнительный барьер 8 располагается по другую сторону относительно основного барьера 1 гофрированного электрода 7. Для ограничения канала ввода и вывода озонируемого газа с боковых сторон используются вкладыши 10.

Устройство для получения озона работает следующим образом. Заданный поток рабочего газа поступает в канал. Далее он проходит в зазоры, образованные поверхностью основного барьера 1 (и поверхностью дополнительного барьера в случае двухбарьерного исполнения) и поверхностями гофрированного электрода 7. При подаче высокого напряжения возникает комбинированный разряд: поверхностно-барьерный от ребер электрода 7 на поверхности барьера 1 (и поверхности барьера 8 в случае двухбарьерного исполнения); поверхностно-объемный между поверхностями темновой зоны барьеров и частями поверхностей электрода 7, расположенными над темновой зоной, и таким образом осуществляется синтез озона. Далее озонгазовая смесь выходит через канал и подается на объект обработки озонем. За счет комбинированного разряда повышается

производительность озонатора. Кроме этого, двухбарьерное исполнение установки также ведет к увеличению производства озона. При соблюдении необходимого расстояния между ребрами l гофрированного электрода 5 ($l \leq 10$ мм) обеспечивается повышенный ресурс работы озонаторной установки.

Однако из-за контрагированности и некоторой локализации микроразрядов возможен выход из строя диэлектрического барьера. С целью дальнейшего повышения ресурса работы генераторов озона, предложено разрядные электроды выполнить изолированными. Действительно, контрагирование разрядных процессов в основном определяется двумя факторами. Первый длиной разрядного промежутка. Происходит контрагирование, если промежуток не менее длины свободного пробега электрона (для воздуха длина свободного пробега электрона примерно 1мм). В поверхностно-барьерном разряде это условие обеспечивается расположением разрядных электродов непосредственно на поверхности барьера и минимальным расстоянием между разрядными электродами. Второй фактор это наличие электродных пятен (катодные и анодные пятна). Такое явление имеет место, если электроды высокопроводящие, (т.е. неизолированные металлические). В предлагаемых устройствах все электроды изолированные. Таким образом, исключается контрагирование и, соответственно локализация разрядных процессов.

На рис.7 и рис.8 приведены схемы конструкций установок озонирования, которые могут быть использованы для осуществления способа.

На рис.7 приведено поперечное сечение озонаторной установки, содержащей основной барьер 1, индуцирующий электрод 2 и комплект разрядных электродов 3, которые изолированы от основного барьера 1 с помощью дополнительных барьеров 4 (барьеры 4 соприкасаются с основным барьером 1. Кроме этого, с целью герметизации камеры озонирования применяются диэлектрические стенки 8 и две прокладки 9. Такая конструкция аналогична конструкции прототипа [17], единственное отличие: разрядные электроды 3 выполнены изолированными. Технологичней и более надежней в работе получается устройство, если использовать отрезки изолированного кабеля. Тогда жила кабеля выполняет роль разрядного электрода 3, а изоляция - роль дополнительного барьера 4. Автоматизированность изготовления и контроля кабеля гарантирует высокую надежность при использовании их в качестве электроразрядных элементов.

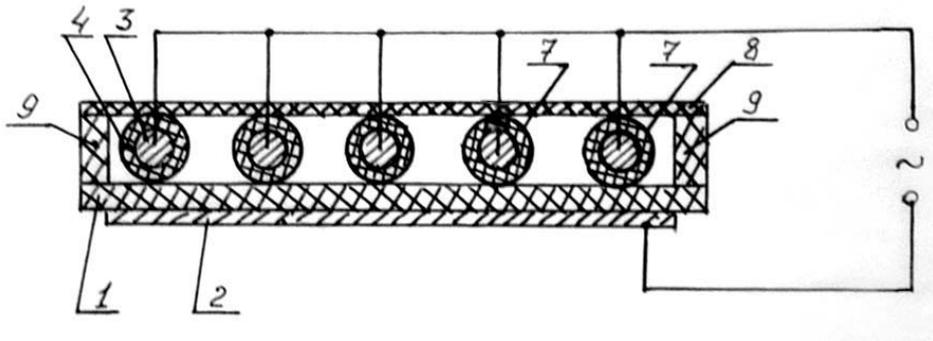


Рис.7

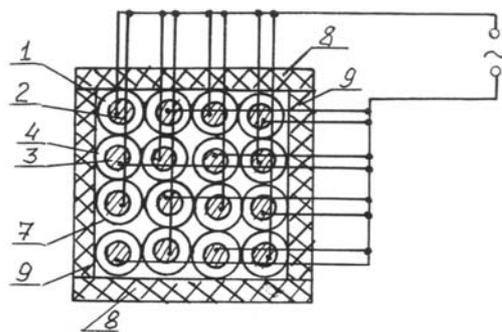


Рис.8

На рис.7 представлен поперечный разрез озонаторной камеры с отрезками кабелей 7 цилиндрической формы, самой распространенной в промышленности и удобной для производства генераторов озона.

Генератор озона работает следующим образом. Заданный поток озонируемого газа поступает в озонаторную камеру. Далее он проходит в разрядные зазоры, образованные поверхностями основного барьера 1 и отрезков кабелей 7. При подаче высокого напряжения клеммы генератора озона, к одной из которых подключены все отрезки кабелей 7, а к другой - индуцирующий электрод 2. В активной зоне на поверхностях основного 1 и дополнительных электродов 4 возникают скользящие разряды и осуществляется синтез озона. Затем озонгазовая смесь выходит из разрядных зазоров и подается на объект обработки озонем. Производительность озонатора можно повысить, если вместо стенки 8 вплотную к отрезкам кабеля 7 установить еще один основной барьер с индуцирующим электродом. Тогда синтез озона будет осуществляться по обеим сторонам озонаторной камеры.

Использование отрезков кабелей 7 цилиндрической формы позволяет более компактно выполнить озонаторную камеру, если основной барьер 1 и индуцирующий электрод 2 выполнить из ряда таких же кабелей 7 цилиндрической формы, как и

разрядные изолированные электроды.

На рис.8 представлен поперечный разрез озонаторной камеры, где разрядные электроды 3, дополнительные барьеры 4, основной барьер 1 и индуцирующий электрод 2 выполнены из отрезков изолированных кабелей цилиндрической формы 7. Причем отрезки кабеля, выполняющие разную роль, располагаются вплотную друг к другу в шахматном порядке. Форма сечения озонаторной камеры может быть разнообразной. Наиболее технологичной и легко реализуемой является прямоугольная форма. Придание необходимой формы сечению камеры и ее сохранение обеспечивается с помощью корпуса. В случае прямоугольной формы, состоящей из двух стенок 8 и двух прокладок 9.

Такой генератор озона рис.8 работает следующим образом. Заданный поток озонируемого газа, поступая в озонаторную камеру, проходит в разрядные зазоры, образованные поверхностями отрезков кабелей 7 (это зазоры между поверхностями цилиндров при расположении их вплотную друг к другу). Все кабели подсоединены к клеммам генератора озона, к одной из которых подключены отрезки кабелей 7, выполняющих роль разрядных электродов 3, а к другой клемме, выполняющих роль индуцирующего электрода 2. Т.е. к каждой клемме подключаются отрезки кабелей, расположенных в шахматном порядке. При подаче высокого напряжения на клеммы генератора озона в разрядной зоне по цилиндрической поверхности отрезков кабелей возникают скользящие разряды и осуществляется синтез озона. Затем озонгазовая смесь подается на объект обработки озоном.

Количество разрядных зон на каждом отрезке кабеля определяется числом линий соприкосновения с соседними отрезками. Для отрезков кабелей расположенных внутри сечения озонаторной камеры количество таких линий равно четырем, для крайних отрезков равно трем и для угловых - двум. Общее количество разрядных зон определяется по формуле: $k=2av-a-v$, здесь a - число рядов, v - число столбцов. Наибольшее количество разрядных зон для одного и того же количества отрезков будет для квадратного сечения и равно $k=2n(n-1)$, где $n=a=v$ - число рядов или столбцов квадратного сечения озонаторной камеры. Такой же вывод справедлив и для обеспечения минимального линейного размера. На рис.8 представлено сечение озонаторной камеры квадратной формы для $n=4$.

В лабораторных условиях был создан ряд озонаторных камер из различных марок кабеля, в том числе ППИ-У и АПВ. Генераторы озона с такими камерами работали при различной частоте с напряжением от 4 кВ до 8 кВ. с удельной производительностью по озону 300 г/кВт. Ни одна из камер не вышла из строя и длительность непрерывной работы генераторов озона составила свыше 4000 часов.

При создании малогабаритных генераторов озона отрезки изолированного кабеля,

из которого выполняются разрядные электроды, можно расположить в пространстве с максимальной плотностью. То есть каждой электрод, кроме граничного, будет соприкасаться с шестью соседними электродами. Для такого озонатора необходимо использовать трехфазный источник питания, причем соприкасающиеся электроды должны быть подключены к разным фазам.

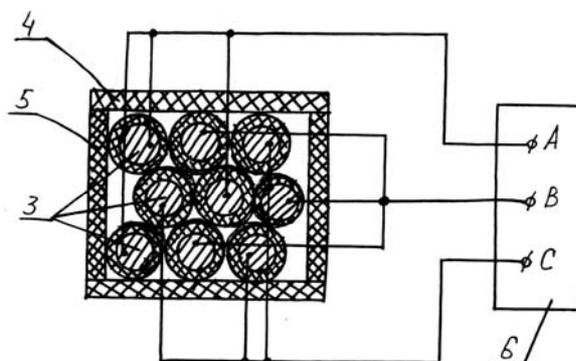


Рис.9

На рис.9 представлен поперечный разрез озонаторной камеры, состоящей из разрядных электродов 3, расположенных вплотную относительно друг друга с максимальной плотностью. То есть каждый разрядный электрод 3, кроме крайних, соприкасается с шестью другими разрядными электродами. Форма сечения озонаторной камеры может быть разнообразной: прямоугольной, треугольной, шестиугольной и т.д. Наиболее технологичной и легко реализуемой является прямоугольная форма. Придание необходимой формы сечению камеры обеспечивается с помощью корпуса. В случае прямоугольной формы, корпус состоит из двух крышек 4 и двух стенок 5.

Такой трехфазный генератор озона рис.9 работает следующим образом. Заданный поток озонируемого газа, поступая в озонаторную камеру, проходит в разрядные зазоры, образованные поверхностями отрезков кабелей 3. Это зазоры между поверхностями цилиндров при расположении их вплотную друг к другу. Все кабели подсоединены к высоковольтному трехфазному источнику питания, причем соседние соприкасающиеся электроды подключены к разным фазам. При подаче высокого напряжения на клеммы генератора озона в разрядных областях возникают поверхностные разряды и происходит синтез озона. Затем озонгазовая смесь подается на объект обработки озоном.

Количество разрядных зон на каждом отрезке кабеля определяется числом линий соприкосновения с соседними отрезками. Для отрезков кабелей, расположенных внутри сечения озонаторной камеры количество таких линий равно шести, для крайних отрезков от двух до пяти. Для случая, представленного на рис.9, когда число рядов равно числу электродов в ряду, количество разрядных областей будет: $k = (3n-1)(n-1)$

где n – количество электродов в ряду. На рис.9 представлено сечение озонаторной камеры для $n=3$.

5. Заключение

В заключении можно сделать следующие выводы:

1. Низкие ресурс работы, надежность и сложность эксплуатации озонаторных установок, выпускаемых отечественной промышленностью и за рубежом - главные причины малоэффективного использования озонных технологий.

2. Диэлектрический барьер - самый уязвимый элемент озонаторных установок. Выход его из строя - результат локализации микрозарядов, обусловленный неустойчивостью барьерного разряда.

3. Работа высокоресурсных безбарьерных озонаторов возможна при очень низких концентрациях озона. Поэтому для эффективной работы озонаторов необходимо использовать барьерный разряд.

4. Использование барьерного разряда в озонаторе, в основу которого положен безбарьерный озонатор с расщепленным электродом, значительно продлевает срок службы барьерных генераторов озона.

5. Эффективное использование наиболее производительных по озону частей каналов микрозарядов осуществляется в многобарьерном озонаторе, который обладает повышенным ресурсом работы и эффективен в пластинчатом исполнении.

6. Применение двухслойного обновляемого барьера из жидкого диэлектрика позволяет увеличить ресурс и производительность озонаторных установок.

7. Вращение барьера - один из кардинальных методов, приводящих к резкому увеличению срока работы барьера и соответственно повышению надежности озонаторных установок.

8. Впервые в качестве источников питания барьерных озонаторов можно использовать и высоковольтные источники постоянного напряжения. Такая возможность обусловлена вращением барьера.

9. Озонаторные камеры, в которых столбы микрозарядов минимальны по длине или полностью отсутствуют, работают на поверхностном разряде. Генератор озона с гофрированным электродом обеспечивает один из высоких выходов по озону и высокий ресурс работы.

10. Предложен новый метод получения озона с поверхностным разрядом между изолированными электродами, с помощью которого увеличивается срок службы генератора озона и резко снижается его перегрев.

11. Проведена разработка и исследования компактных озонаторных камер с использованием нового метода получения озона. Лабораторные исследования показали высокую надежность, производительность и простоту эксплуатации.

12. Разработана камера для трехфазного генератора озона, как наиболее перспективной и экономичной установки.

Литература

1. Самойлович В.Г., Гибалов В.И., Козлов К.В. Физическая химия барьерного разряда. Изд. МГУ. М.,1989.
2. Анализ состояния производства озонаторного оборудования. Информационный центр "Озон", Вып. №4, М.,1997.
3. А.с. 597173 (СССР), кл. С 01 в 13/11.
4. А.с. 564258 (СССР), кл. С 01 в 13/11.
5. А.с. 1239091 (СССР), кл. С 01 В 13/11.
6. А.с. 1390182 (СССР), кл. С 01 В 13/11.
7. Патент РФ 2211800, кл.С 01 13
8. Коробцев С.В., Лебедев Д.Д., Ширяевский В.А.// "Озон и другие экологически чистые окислители. Наука и технологии", Материалы 25-го Всероссийского семинара. Москва,2003,с.31-35.
9. А.С. 1081954 (СССР), кл. С 01 в 13/11, С 25 В 1/00.
10. Патент на полезную модель 32103 кл.С 01 В 13/11.
11. Ю.П. Пичугин// "Озон и другие экологически чистые окислители. Наука и технологии". Материалы 25-го Всероссийского семинара. Москва, 2003,с.36-47.
12. Патент РФ 2227119 кл. С 01 В13/11.
13. А.с. 1181991 (СССР) кл. С 01 В13/11.
14. Ю.П. Пичугин // Информационный центр "Озон", вып.№13.Материалы 20-й конференции "Генераторы озона и озонные технологии". Москва, 2000,с.43-50.
15. Патент РФ 2027664 кл. С 01 В 13/11.
16. Патент РФ 2118938 кл.С 01 В 13/11.
17. Masuda S.Industrial Applications of Electrostatics // Journal of Electrostatics.1981. V/10. P.1-14.
18. Калинин А.В., Козлов М.В., Панюшкин В.В.//Известия Академии наук. Энергетика.№4.Москва,1993,с.45-51.