

## **СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В КОНСТРУИРОВАНИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОЗОНАТОРОВ**

В.Г.Самойлович<sup>1</sup>, В.В.Панин<sup>2</sup>, Л.Н.Крылова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, химический факультет

<sup>2</sup> Московский государственный институт стали и сплавов (технологический университет)

### Аннотация

С целью выбора озонатора для использования в гидрометаллургии проведен анализ конструкций и показателей промышленных генераторов озона. Рассмотрены современные тенденции в конструировании озонаторов, технологические и конструкционные параметры, влияющие на эффективность синтеза озона. Тенденции в конструировании озонаторов определяются требованиями к технико-экономическим показателям производства озона в связи с увеличением объемов и расширением областей применения озона в промышленности. Основным критерием совершенства конструкции озонаторов является эффективность образования озона и соответственно снижение энергетических затрат на его получение. Достижение этой цели осуществляется при конструировании озонаторов - применение кислорода для синтеза озона, значительное повышение концентраций озона, уменьшение диаметра трубчатых электродов и разрядных промежутков, изыскания оптимальных энергетических параметров источника питания и методов охлаждения электродов, использование диэлектриков, отличающихся высокой теплопроводностью и технологичностью применения и др. Представлены современные конструкции озонаторов, характеризующие основные тенденции в озонаторостроении.

Применение озона в промышленности в значительной степени зависит от затрат на его производство. На получение озона расходуется большое количество энергии, большая часть которой является непроизводительной. В связи с этим усилия исследователей и конструкторов направлены, прежде всего, на повышение эффективности образования озона, т.е. снижение энергетической цены озона.

Вложенная в разряд энергия существует, в основном, в виде энергии электронов, которые производят диссоциацию, ионизацию и нагрев газа. За время жизни микроразряда газ нагревается на доли градуса и последующие пробои происходят в практически холодном газе. Эти особенности - быстрый пробег электронов по холодному газу, диссоциация кислорода с образованием озона и прекращение разряда сразу же после пробоя объясняют эффективность образования озона в барьерном разряде.

Минимальный расход электроэнергии, т.е. когда вся электроэнергия вкладывается в диссоциацию молекулы кислорода, составляет 0,82 кВт×ч/кг. С учетом потерь связанных с ионной компонентой и другими видами неупругих потерь энергии электронов величина затрат энергии возрастает до 2,3-2,8 кВт×ч/кг [1].

Энергетические затраты на получение озона за последние полвека уменьшилась более чем в 2 раза. Минимальное значение энергопотребления в современных озонаторах при использовании кислорода достигает 4,0-5,0 кВт×ч/кг .

Конструкции современных озонаторов в соответствии с требованиями промышленности и условиями повышения эффективности образования озона ориентировано на производство все более высокой концентрации озона.

Повышение концентрации озона приводит к уменьшению энергетической цены озона, увеличение скорости процессов окисления и дезинфекции, снижению объемов потоков газа, уменьшению габаритов установки.

Получение высоких (до 150 г/м<sup>3</sup>) и сверхвысоких концентраций озона (до 250 г/м<sup>3</sup>) возможно лишь при замене воздуха на кислород. Использование кислорода является менее затратным способом производства, что следует из результатов расчетов, представленных в таблице 1 [2].

Таблица 1 – Затраты на производство озона

Рабочий газ	Затраты на электроэнергию, руб.	Затраты на воду, руб.	Суммарные затраты на получение озона, руб.
Воздух	14,3 – 17,6	29,6 – 42,8	43,9 - 60,4
Кислород	11,5 – 13,2	17,3 – 21,4	28,8 – 34,6

Расчёты произведены по тарифам начала 2002 года - на электроэнергию 0,84 руб/кВт×ч и на воду 10,2 руб/м<sup>3</sup> и не учитывают капитальные затраты и другие эксплуатационные расходы, так как они мало различаются для воздуха и кислорода. В соответствии с этими расчетами суммарные расходы на электроэнергию и охлаждающую воду при использовании воздуха на 50 - 75 % выше, чем при использовании кислорода. В современной практике озонаторостроения крупные комплексы производству сотен килограмм озона в час работают только на кислороде. При этом кроме снижения энергопотребления и повышения концентрации озона, решаются проблемы связанные с образованием окислов азота и необходимостью осушки газа.

На эффективность синтеза озона в барьерном разряде влияют параметры плазмы, например электрическая мощность, напряжение, частота; физико-химические параметры -

давление и скорость потока газа через разряд, температура газа, его состав и влажность; конструкционные параметры озонатора - величина разрядного промежутка, схема охлаждения, материал и толщина диэлектрика, поверхность и материал электродов и др. (рисунок 1).

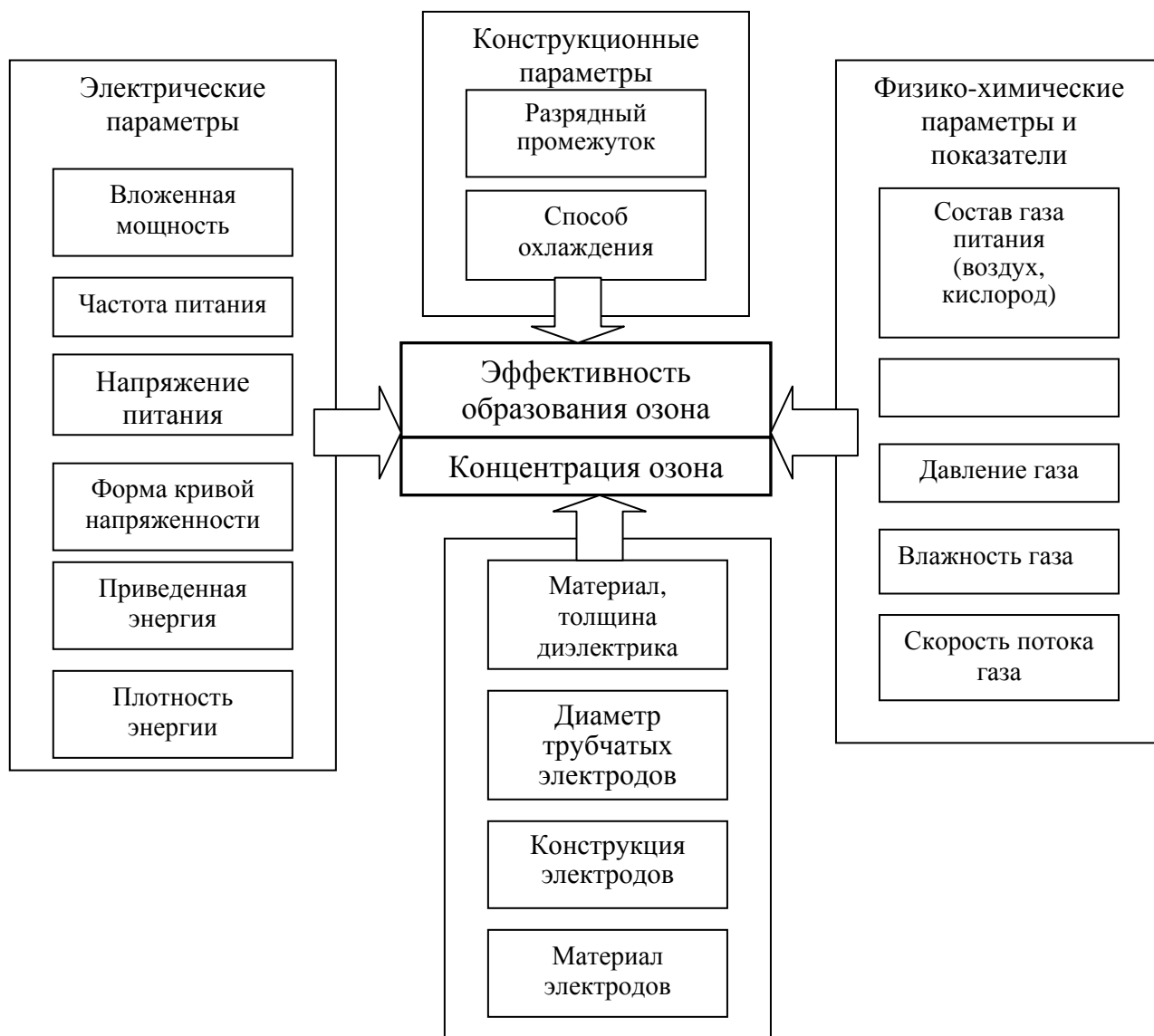


Рисунок 1 – Основные параметры влияющие на эффективность образования и концентрацию озона

Основным электрическим параметром является “активная”, т.е. вложенная в разряд мощность -  $P$ . Значение активной мощности в барьерном разряде определяется по формуле Мэнли [3]:

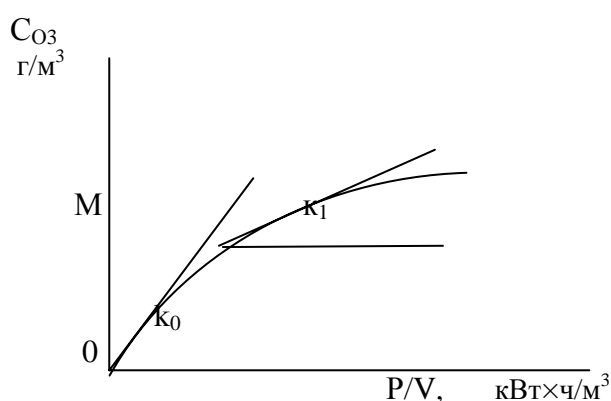
$$P = 4 f c_d V_{гор} [V_{пик} - V_{гор} (1 + c_{газ}/c_d)] \quad (1)$$

где  $f$  - частота питания,  $V_{гор}$  - напряжение горения разряда,  $V_{пик}$  - внешнее приложенное напряжение,  $c_{газ}$  и  $c_d$  - емкости газового промежутка и диэлектриков. Из формулы Мэнли

следует возможность линейно увеличивать активную мощность разряда меняя частоту и напряжение питания.

Для характеристики электрических параметров используется фактор приведенной энергии и аналогичный параметр Беккера -  $P/V$ , которые по физическому смыслу соответствуют энергии введенной в газ,  $V$ -объемная или массовая скорость газа [4],

Зависимость концентрации озона  $C_{O_3}$  от фактора  $P/V$  линейная в начале, затем становится нелинейной (рисунок 2), что связано с существованием обратной реакции разложения озона в разряде.



точка 0  $\epsilon_0 = 1/k_0 = \text{кВт}\times\text{ч}/\text{кг}$

точка М  $\epsilon_1 = 1/k_1 = \text{кВт}\times\text{ч}/\text{кг}$

Рисунок 2 – Зависимость концентрации озона от приведенной энергии

Тангенс угла наклона кинетической кривой в начальной точке  $k_0$  максимален,  $k_0 > k_1$ , где  $k_0$  - предельный энергетический выход (г/кВт×ч) озона,

$\epsilon_0 = 1/k_0$  - энергопотребление (кВт×ч/кг) при минимальной концентрации озона.

$k_1$  - энергетический выход при  $c > 0$ ,  $\epsilon_1 = 1/k_1$  - энергопотребление при  $c > 0$  и  $\epsilon_0 < \epsilon_1$ .

Формально, на начальных участках кривой на рисунке 2, концентрация озона равна  $C = k_0 (P/V)$ , производительность по озону -  $A = k_0 P$  (г/ч), отсюда следует, что при увеличении мощности разряда и массы, протекающего через него газа, можно получать любые количества озона. На самом деле, при увеличении удельной плотности мощности  $P/S$  ( $S$  - поверхность электродов), увеличивается скорость обратной реакции разложения озона и повышается температура газа. Из-за термической нестабильности озона, при увеличении удельной мощности, кинетическая кривая, пройдя через максимум, начинает падать (рисунок 2). Повышение мощности без значительного увеличения температуры – это одна из проблем, возникающая при создании озонаторов.

Параметры микроразряда, в частности плотность энергии, оказывают влияние на величину энергетического выхода озона. В обычном разряде плотность энергии в микроразряде составляет обычно около  $10 \text{ мДж/см}^3$ . Существуют возможности уменьшить плотность энергии – импульсное питание, сетчатые электроды, добавки других газов, понижение давления и др., которые пока не используются в промышленных озонаторах.

Согласно формуле мощности (1) входная ёмкость озонатора “металл-диэлектрик”(МД) в 2 раза выше, чем в озонаторе “диэлектрик-диэлектрик” (ДД). Следовательно, входное сопротивление в 2 раза ниже и мощность, рассеиваемая в озонаторе МД также в 2 раза выше. Такой озонатор работает при более низком значении питающего напряжения, что упрощает конструкцию источника. В ряде экспериментальных работ [5,6] показано, что в озонаторе МД образуется меньше озона, т.к. у диэлектрика его концентрация выше. Это относится как к использованию кислорода, так и к использованию для синтеза озона воздуха. Таким образом, если требуется высокая концентрация озона, то используют конструкцию “диэлектрик-диэлектрик” и кислород. Действительно, выпускаемые серийно озонаторы ( $\text{C}_{\text{O}_3} > 200 \text{ мг/л}$ ), например, в электронной промышленности для снятия фоторезистора или при очистке сточных вод, обычно, имеют плоскую конструкцию с вариантом ДД. Плоская конструкция к тому же даёт возможность создавать и строго поддерживать очень малые значения разрядных промежутков.

### **Поверхность электродов и диаметр трубчатых электродов**

В формулу Мэнли (1) входит величина ёмкости диэлектрика  $C_d$ , следовательно, мощность  $P$  пропорциональна площади диэлектрика, поскольку  $C_d$  линейно связана с площадью. Производительность озонатора можно увеличивать за счёт увеличения площади электродов, в частности количества трубчатых электродов. В то же время увеличение их количества ведёт к повышению металлоёмкости, осложняет равномерность энергетической загрузки и создает проблему поиска и замены пробитых электродов.

Для увеличения разрядной площади для трубчатых озонаторов используется самое простое решение - уменьшение диаметра труб. В классических конструкциях иностранных и отечественных озонаторов «Озония» «Трейлигаз» используются трубы диаметром 50-80мм, у фирмы “Ведеко” и “Шмидинг” диаметр труб 12 - 14 мм, в отечественных конструкциях используются и меньшие значения диаметров. В озонаторе Пантелеева В.И. (Вятский технический университет) и близком по конструкции озонаторе Курчатовского института диаметр труб 4-5 мм. В озонаторах фирмы «Тринити» применяются капиллярные трубки, что позволяет снизить энергозатраты в два раза.

### **Температура, охлаждение электродов**

Эффективность и технико-экономические показатели образования озона зависят от температуры газа в разрядном промежутке, поэтому одним из направлений совершенствования озонаторов является метод охлаждения электродов.

В настоящее время в промышленных озонаторах реализованы 2 варианта охлаждения - одностороннее и двухстороннее.

Классический вариант одностороннего охлаждения или охлаждения одного электрода реализован в конструкции озонаторов Велсбаха. В тонкостенной металлической трубе, охлаждаемой с внешней стороны водой, расположена диэлектрическая труба, металлизированная изнутри для подвода высокого напряжения. Таким способом охлаждаются озонаторы большинства отечественных предприятий - “Курганхиммаш”, “Техозон”, “Сиэл”, завод имени Хруничева.

Преимуществом конструкции является технологичность эксплуатации, смена электрода при разрушении диэлектрика занимает 15 - 20 минут. Практически все возможные пути повышения эффективности этой конструкции исследованы и оптимизированы. К недостаткам такой конструкции относятся, малая удельная производительность и большая металлоёмкость.

Более сложный вариант одностороннего охлаждения реализован в озонаторе американской фирмы “Osmonics”, работающей совместно с японской корпорацией “Фуджи”. В конструкции диэлектрик наносится на внутреннюю поверхность охлаждаемой металлической трубы с помощью запатентованной технологии «Micro-Gar» [7]. Технология позволяет нанести очень тонкий слой свинцового стекла, разрядный промежуток 0,3 мм строго выдерживается на длине 1 метр. Внутренний электрод – тонкостенная металлическая труба, находится под высоким напряжением и охлаждается водой. Технология «Micro-Gar» препятствует появлению горячих пятен на диэлектрике, что снижает температуру газа. Озонаторы конструкции «Osmonics» позволяют производить высокие и сверхвысокие концентрации озона. В случае пробоя диэлектрика, необходимо менять металлическую трубу, для чего, в свою очередь, сливать воду из всего озонатора. Это оправдывается лучшим теплоотводом - на 10 - 12 % , т.к. большая часть тепла в барьерном разряде выделяется вблизи диэлектрического электрода [8].

Двухстороннее охлаждение, когда охлаждается и второй электрод, увеличивает теплоотвод в 4 раза, что позволяет повысить частоту питания до 2 - 4 кГц. Основная проблема здесь - охлаждение высоковольтного электрода, который находится под высоким напряжением. Существует несколько возможных решений этой проблемы:

Вариант 1. Охлаждение высоковольтного электрода водой, подводимой через изолирующие спирали, которые “гасят” высокое напряжение. Конструкция широко

используется в лабораторных устройствах, но для промышленных озонаторов неприемлема из-за недостаточной стойкости пластика во времени.

Вариант 2. Охлаждение высоковольтного электрода диэлектрической жидкостью. Такое решение технически сложно, но реализуемо в промышленных озонаторах, в частности, в озонаторе ВЭИ, где используется деионизированная вода. При использовании особо чистой воды, необходимо контролировать её проводимость и в случае увеличения применять специальную очистку. Так как вода должна работать в обороте, необходимо также установление теплообменника и холодильной машины, которая для надёжности должна дублироваться. Применение специальных диэлектрических жидкостей - масел и полимерных субстанций, не устраняет вышеперечисленных проблем.

Озонаторы с охлаждением по 1 и 2 вариантам использовали на заводе “Химвтоматика” (Воронеж) и заводе им. Хруничева. Широкого распространения эти конструкции не нашли, вместе с тем японская фирма “Мицубиси” сообщила о создании подобного озонатора производительностью 40 кг озона в час.

Вариант 3. Охлаждения высоковольтного электрода за счёт использования тепловой трубы. В этом случае процесс отвода тепла за счёт обычной молекулярной теплопроводности заменяется отводом тепла за счёт фазового перехода “жидкость - пар”. Такая конструкция может быть реализована в том случае, когда внутрь высоковольтного электрода заливается легкокипящая жидкость, например фреон. Испаряясь, фреон уносит тепло в виде пара в теплообменник, где, охлаждаясь, стекает вниз, и такая циркуляция позволяет “снять” в 4 - 5 раз больше тепла, чем в вариантах 1 и 2. Подобная конструкция была создана и испытана в фирмой “Триовита” (Москва) в конце 80-х годов. Конструкция оказалась неудачной и охлаждение электрода не происходило, однако был ряд интересных технологических решений, например, высоковольтный электрод был изготовлен из алюминия с диэлектрическим покрытием из низкотемпературной эмали.

Кроме вышеперечисленных способов, в патентной литературе отмечен целый ряд оригинальных решений по проблеме охлаждения электродов.

По данным фирмы “Трейлигаз” температура газа понижается при использовании не обычной синусоидальной или трапециевидной формы кривой питающего напряжения, а в виде высокочастотных пакетов, наложенных на низкочастотную составляющую, промышленной реализации данной идеи неизвестно.

Заметное разложение озона начинается при нагреве газа выше 50<sup>0</sup>С, что накладывает ограничение на вкладываемую мощность. Полуэмпирическая зависимость,

связывающая температуру и плотность мощности, в предположении равномерного выделения тепла по разрядному промежутку:

$$\Delta T_{\text{газ}} = k d/\lambda \cdot (P/S) \quad (2)$$

где  $d$  - величина разрядного промежутка,  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности,  $k = 1/3$  при охлаждение одного электрода,  $k = 1/12$  для двустороннего охлаждения.

При  $d=1$  мм без охлаждения электродов повышение температуры до  $50^{\circ}\text{C}$  достигается при плотности мощности  $P/S = 1 \div 2 \text{ кВт} \times \text{ч}/\text{м}^3$ .

Из формулы (2) следует:

а) двухстороннее охлаждение позволяет “закачать” в озонатор в четыре раза больше энергии, чем одностороннее;

б) отвод тепла может быть резко увеличен за счет турбулизации протекания газа через разрядный промежуток, т.к. коэффициент теплопроводности  $\lambda_{\text{ламин.}} \ll \lambda_{\text{турбулент.}}$ . Делаются попытки реализовать турбулентный режим в разрядном промежутке;

в) снижение температуры может осуществляться уменьшением разрядного промежутка при той же плотности тока.

### **Разрядный промежуток**

Целесообразность использования малых разрядных промежутков при синтезе озона в барьерном разряде была подчеркнута японскими исследователями на 13-ом международном конгрессе ИОА в 1977 в Киото. Тепловыделение в разрядном промежутке не равномерное и сосредоточено в основном в пристеночных областях. С уменьшением разрядного промежутка увеличивается доля вклада приэлектродных областей, где образование озона идет более интенсивно [9], а также как бы уменьшается «провал» по интенсивности образования в центре разрядного промежутка.

Скорость реакции диссоциации молекулы кислорода при электродном ударе, а именно в этом процессе возникают атомы кислорода, образующие затем озон, зависит от энергии электронов и, следовательно, от напряженности электрического поля. В малом разрядном промежутке средняя напряженность поля выше. Если бы было возможно увеличить напряженность поля, то скорость образования озона увеличилась бы. В принципе это возможно, если используется импульсное питание озонатора с очень крутым фронтом  $1 \text{ кв}/\text{н} \cdot \text{сек}$  и выше. Минимальное энергопотребление на синтез озона  $2,5-2,8 \text{ кВт ч}/\text{кг}$  получено использованием этого метода [10].

Эффект повышения напряженности поля в малых разрядных промежутках и его воздействие на синтез озона был ясно показан в работе японских исследователей [11]. Используя теоретическое значение сечения диссоциации молекул озона и кислорода электронным ударом они показали, что при повышении напряженности электрического



поля в разрядном промежутке эффективность диссоциации кислорода, а следовательно и образование озона, растет, в то время как разложение озона падает.

Используя лабораторный плоский озонатор была измерена эффективность синтеза озона на кислороде при различных значениях удельной энергии и различных величинах промежутков, но при одинаковой температуре газа в разряде, для чего поддерживался постоянным параметр  $P/S \times d$ .

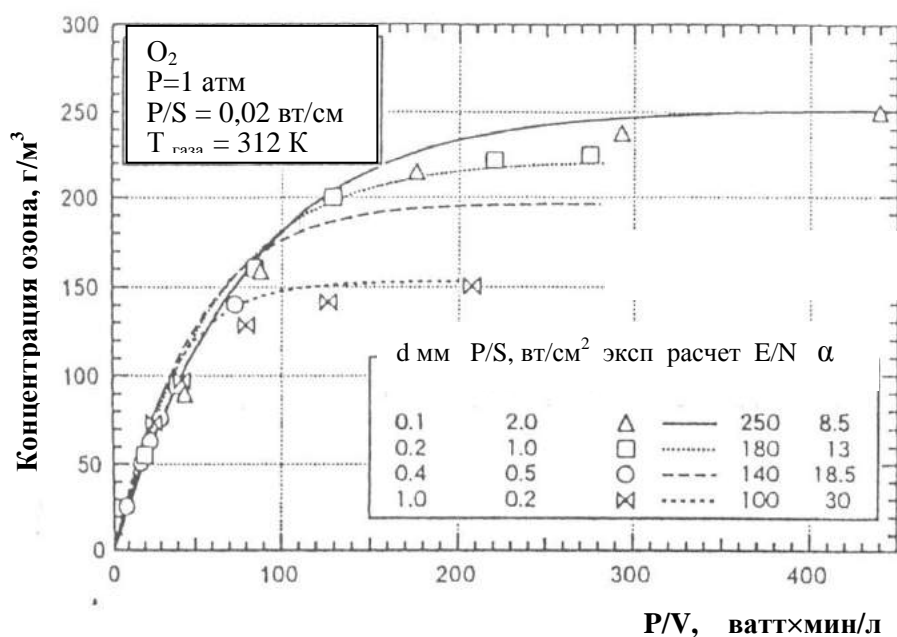


Рисунок 3 – Влияние разрядного промежутка на образование озона

Эти исследователи [11] получили интересные данные о зависимости эффективности синтеза озона от давления в случае небольших разрядных промежутков, включая очень маленькие 0,1 мм (рисунок 4).

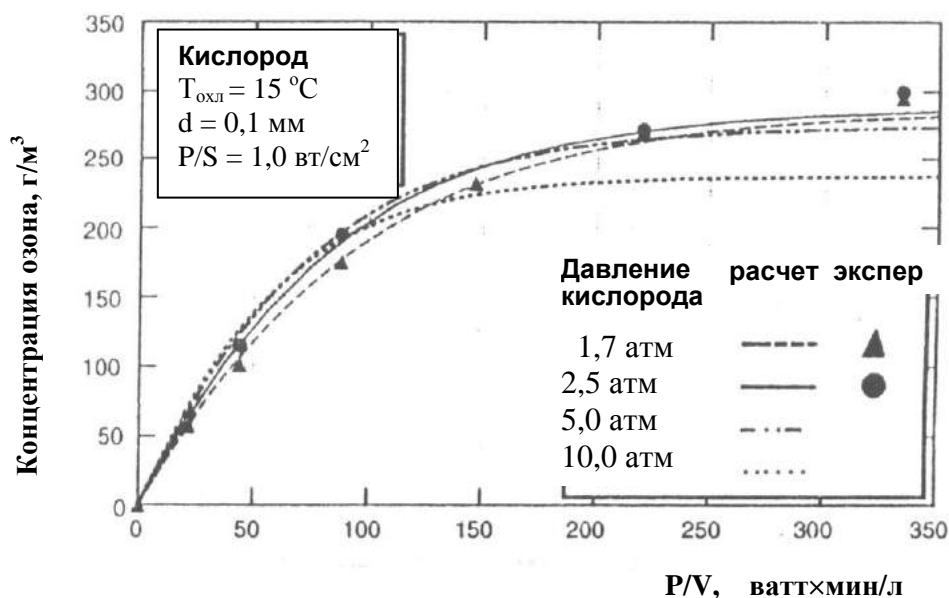


Рисунок 4 – Зависимость концентрации озона от давления газа

В малых разрядных промежутках озон более эффективно синтезируется и из воздуха. В этом случае существует оптимальное соотношение между давлением газа и величиной разрядного промежутка:

$$P \times d = 150 \text{ (торр} \times \text{см)} \quad (3).$$

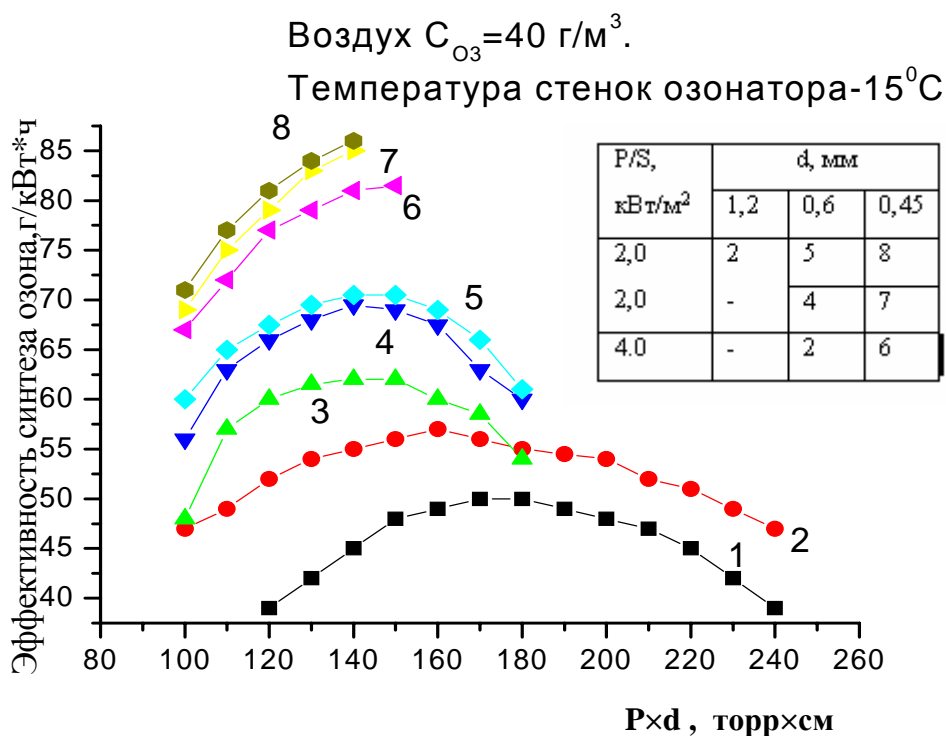


Рисунок 5 – Зависимость эффективности синтеза озона от плотности мощности и величины разрядного промежутка

По экспериментально полученным зависимостям [11] эффективности синтеза озона от плотности мощности и величины разрядного промежутка (рисунок 5), следует «выгода» работы с малыми разрядными промежутками.

Для синтеза озона концентрацией  $40 \text{ г/м}^3$  из воздуха, согласно данным рисунка 5, при разрядном промежутке  $d=1,2 \text{ мм}$  энергетические затраты в оптимальных условиях составляют  $\sim 17,5 \text{ кВт} \times \text{ч/кг}$ , при  $d=0,45 \text{ мм}$  эта величина снижается до  $11,6 \text{ кВт} \times \text{ч/кг}$ .

Таким образом, уменьшение величины разрядного промежутка приводит к важным технологическим изменениям:

- снижение температуры газа в разрядном промежутке;
- интенсификация синтеза озона при одинаковых значениях температуры;
- повышение концентрации озона;
- снижение энергетических затрат.

Трубчатый японский озонатор с наименьшим разрядным промежутком 0,1 мм и производительностью до 1 кг/ч озона производит озон концентрацией выше 250 г/м<sup>3</sup>.

### Материал диэлектрика

В современных конструкциях озонаторов в качестве диэлектрика вместо стекла используются новые материалы – стеклоэмаль, оксид алюминия и керамика.

В конструкциях с односторонним охлаждением процессы теплоотвода через неохлаждаемый диэлектрик не играют роли и материал диэлектрика не существен. Использование не стеклянных диэлектриков в подобных конструкциях можно объяснить возможностью нанесения таких материалов диэлектрика малой толщиной с высокой геометрической точностью и электрической прочностью. Новые электроды имеют малую толщину диэлектрического покрытия с высокой геометрической точностью, например 0,5 мм с точностью по диаметру порядка 0,05 мм на длине 400-500 мм, что позволяет снизить величину разрядного промежутка и повысить концентрацию озона.

В конструкциях с двухсторонним охлаждением через диэлектрик происходит отвод тепла, поэтому играет роль теплопроводность материала диэлектрика (таблица 2). Использование в этом случае стеклоэмали и окиси алюминия, обладающих большей теплопроводностью, чем стекло, предпочтительнее.

Таблица 2 – Теплопроводность материалов используемых в озонаторах

Материал	Титан	Сталь нержав.	Стекло	Кварц	Окись титана	Окись алюминия
Теплопроводность Вт /м ·сек ·°С	10	20	1,0	1,4	3	30

Современные высоковольтные электроды озонаторов фирмы “Озония” являются секционированными, каждая секция длиной ~400 мм имеет разброс по диаметру на длине секции менее чем ±0,01 мм. Это даёт возможность работы с малыми и однородными разрядными промежутками около 0,3 - 0,4 мм и в результате приводит к быстрому установлению теплового равновесия, высокой концентрацией озона и т.п.

В конструкции озонаторов американской фирмы “OSMONICS INC” и японской фирмой ”Фуджи” тонкий слой диэлектрика из свинцового стекла нанесен на внутреннюю поверхность охлаждаемой металлической трубы, разрядный промежуток 0,3 мм сохраняется на длине 1 метр, внутренний электрод - тонкостенная металлическая труба, находящаяся под высоким напряжением и охлаждаемая водой. Озонатор успешно функционируют 10 лет и позволяет получать озон концентрацией до 200-220 г/м<sup>3</sup> с энергозатратами 6,5-8,5 кВт×ч/кг. Разработана также конструкция с охлаждением

центрального электрода, в этом случае, по данным авторов, достигается концентрация 259 г/м<sup>3</sup> и энергопотребление снижается в два раза, другой информации об этой конструкции нет.

### **Озонаторы с плоскими электродами**

Озонаторы с плоскими электродами, несмотря на меньшую технологичность изготовления электродов по сравнению с трубчатыми конструкциями, имеют ряд преимуществ перед последними - большая поверхность электродов, компактность, возможность установления разрядных промежутков до 0,1 мм с высокой точностью и создание малой толщины диэлектриков 0,3- 0,5 мм.

Фирма "Сумитомо" к середине 80-х годов разработала и испытала озонаторы с плоскими электродами, которые состоят из плоских стеклянных диэлектриков плотно прикрепленных к алюминиевым радиаторам охлаждаемым маслом, разрядный промежуток 0,8 мм, концентрация озона до 140 г/м<sup>3</sup> и энергопотребление 8 кВт×ч/кг.

В плоских озонаторах фирмы "Olmsted and Co" (Швеция) между двумя охлаждающимися электродами, с диэлектриком из двуокиси алюминия, зажимается сетка толщиной около 0,1 мм через которую по специальным проходам пропускается газ. Озонаторы производительностью до 1 кг/ч озона, позволяют получать озон концентрации до 240 г/м<sup>3</sup> при питании кислородом, давление до 6 атм., температура от 5-20<sup>0</sup>С, потребление энергии 7,5-10,0 кВт×ч/кг озона. Высокая концентрация озона достигается на кислороде, полученном при испарении жидкого кислорода.

Единственный в России промышленный озонатор с плоскими электродами разработан Всесоюзным институтом электротехники. Электроды озонатора представляют собой тонкостенные < 1мм гофрированные диски диаметром 40 см покрытых эмалью толщиной 0,5 мм, соединенных попарно сваркой и охлаждаемые изнутри водой. Величина разрядного промежутка 0,5÷0,6 мм. Для охлаждения озонаторов используется деионизированная вода с соответствующей системой кондиционирования. Эта вода циркулирует по замкнутому контуру и охлаждается в холодильной машине до 6<sup>0</sup>С, поглощенное, тепло рассеивается за счет воздушного охлаждения. На этом озонаторе получены следующие результаты: При синтезе озона из воздуха концентрация составляет 20 г/м<sup>3</sup>, энергозатраты на синтез озона ~ 12 кВт×ч/кг, а общие энергозатраты, включая холодильную машину ~ 15,7 кВт×ч/кг. При синтезе озона из кислорода концентрация озона составляет около 100 г/м<sup>3</sup>, энергозатраты на синтез озона ~ 8,8 кВт×ч/кг, а общие энергозатраты 12 кВт×ч/кг.

Несмотря на относительно низкий энергетический расход на получение озона из воздуха общие энергозатраты составляют не менее 16 кВт×ч/кг при концентрации озона.

## Выводы

В конструировании озонаторов в последние годы определились следующие тенденции, подчиненные требованиям промышленности и цели повышения эффективности образования озона:

- применение кислорода для синтеза озона;
- получение высоких 100-150 г/м<sup>3</sup> и сверхвысоких концентраций озона 220-250 г/м<sup>3</sup>;
- уменьшение разрядных промежутков до 0,1-0,5 мм выдерживающихся с высокой точностью по всей длине электрода;
- использование новых диэлектриков – стеклоэмали, керамики, окиси алюминия, с высокой теплопроводностью и небольшой толщиной 0,3 - 0,5 мм.
- увеличение электродной поверхности за счет уменьшения диаметра трубчатых электродов;
- использование конструкций плоских электродов.

Реализация данных тенденций в конструкциях озонаторов позволяет значительно снизить энергетические затраты на синтез озона.

## Список использованных источников

1. Braun D. and Pietsch G. ISPS-10 1991 p.426-431.
2. Абрамович Л.Ю. и др. / Сб. докл. симп. “Электротехника 2003”, т. 4, с.306-311.
3. Manley T. // Trans. Electroch. Soc. 1944. v. 84. p. 83.
4. Васильев С.С. и др. // Журн. физ. химии. 1936. т. 10. с. 619.
5. McNally M. // Nature, 1967, v. 216, p.259-260.
6. Mechtchersheimer G. et al Proc. 18th Int. Conf on Phenomena in Ionized Gases. Swansea, 1987. p. 522-523.
7. Рекламные материалы фирмы «Osmonics».
8. Пэйго Ли Автореферат канд. дисс. М.:МЭИ, 1998.
9. McNally M. // Nature, 1967, v. 216, p.259-260.  
Heuser C. Zur Ozonerzeugung in elektrischen Gasentladungen 1985. Ph. Thesis RWTH Aachen.
10. Salge D. et al. Proc 5-th Int. Symp on Plasma Chem. Edinburgh 1981 p.427-432.
11. Kazumoto M. et al / Proc. 13<sup>th</sup> Ozone World. Congress Kyoto, Japan. 1997, v.1, p.815-820.  
Kitayawa J. et al. / Proc. 13<sup>th</sup> Ozone World. Congress Kyoto. 1997, v.1, p.791-796.