

5. Sokolova M.V., Kozlov K.V., Krivov S.A. et al. The influence of dielectric films on the macro- and microscopic properties of the barrier surface discharges. – Proc of Int. Symp. on Low Temperature High Pressure Plasma Chemistry (NAKONE 12), Slovakia, 2010, vol. 1.

6. Соколова М.В., Козлов К.В., Кривов В.Г. и др. Исследования излучения поверхностного разряда в сухом воздухе. – Письма в ЖТФ, 2009, т. 35, вып. 5.

7. Соколова М.В., Темников А.Г., Кривов С.А. О механизме взаимодействия поверхностного электрического разряда с диэлектрическим барьером. – Электричество, 2010, №7.

8. Sokolova M., Hulka L., Pietsch G. Influence of a Bias Voltage on the Characteristics of Surface Discharges in Dry Air. – Plasma Processes and Polymers, 2005, vol. 2.

9. Багиров М.А., Малинин В.П., Абасов С.А. Воздействие электрических разрядов на полимерные диэлектрики. Баку: Изд-во Элм, 1975.

10. Митрев. П., Бенвенути Дж. и др. Фазовые переходы в тонких плёнках оксида титана под действием излучения эксимерного лазера. – Письма в ЖТФ, 2005, т. 31, вып.21.

11. Ахметов Т.Г., Порфирьева Р.Т., Гайсин Л.Г. и др. Химическая технология неорганических веществ. Кн. 1/Под ред. Т.Г. Ахметова. – М.: Высшая школа, 2002.

*Авторы: Лазукин Александр Вадимович окончил Институт электроэнергетики (ИЭЭ) Московского энергетического института (МЭИ) в 2011 г. Аспирант кафедры ТЭВН МЭИ.*

*Митин Алексей Николаевич окончил ИЭЭ МЭИ в 2010 г. Аспирант кафедры ТЭВН МЭИ.*

*Соколова Марина Владимировна окончила электроэнергетический факультет (ЭЭФ) МЭИ в 1960 г. В 1970 г. защитила кандидатскую диссертацию «Коэффициент ионизации и начальные напряжения в смесях простейших газов» в МЭИ. Ведущий научный сотрудник кафедры ТЭВН МЭИ.*

*Кривов Сергей Анатольевич окончил ЭЭФ МЭИ в 1980 г. В 2000 г. защитил докторскую диссертацию «Разработка научных основ электрической сепарации по проводимости» в МЭИ. Профессор кафедры ТЭВН МЭИ.*

\* \* \*

## Энергетические характеристики синтеза озона в поверхностном и объемном барьерных разрядах

ЛЫСОВ Н.Ю., ПАШИН М.М.

*Сравнивается энергетическая эффективность озонаторов с объемным и поверхностным барьерными разрядами. Показаны преимущества озонаторов с поверхностным барьерным разрядом при синтезе озона концентрацией до 50 г/м<sup>3</sup>. Дана оценка влияния конструктивных и технологических факторов на эффективность синтеза озона.*

**Ключевые слова:** озон, барьерный разряд, энергозатраты

*The power performance indicators of ozonizers with bulk and surface barrier discharges are compared. The advantages of ozonizers with surface barrier discharge are shown for the case of synthesizing ozone with a concentration of up to 50 g/m<sup>3</sup>. The influence of design and technological factors on the efficiency of the ozone synthesis process is estimated.*

**Key words:** ozone, barrier discharge, energy expenditures

Для производства озона в основном используют озонаторы с объемным барьерным разрядом (ОБР), которые позволяют получать озон высоких концентраций (более 100 г/м<sup>3</sup>) [1]. Однако стоит отметить, что изготовление таких озонаторов технически сложно и дорого. Также стоит сказать, что некоторые технологические процессы не требуют озона высокой концентрации, например в водоподготовке, медицине, сельском хозяйстве. Существуют также озонаторы и с поверхностным барьерным разрядом (ПБР), более простые и дешевые, но позволяющие получать озон высокой концентрации.

Целью статьи является сравнение энергетических характеристик синтеза озона в генераторах озона (ГО) на основе объемного и поверхностного барьерных разрядов и оценка влияния их конструктивных и технологических параметров на эффективность синтеза озона.

В первой части работы проводилось сравнение энергозатрат (Э) на синтез озона в ГО с ОБР и ПБР. Для этого были изготовлены два озонатора, ГО которых схематически изображены на рис. 1. В обоих случаях в качестве диэлектрического барьера использовалась стеклоэмаль толщиной 0,5 мм, нанесенная на электроды из нержавеющей стали. В ГО озона рис. 1,а был реализован ОБР. Системы охлаждения высоковольтного и заземленного электродов были независимы друг от друга. В ГО рис. 1,б синтез озона происходил в ПБР. Заземленный электрод, покрытый эмалью, имел точно такую же конструкцию, что высоковольтный электрод в случае ОБР. Напряжение подавалось на алюминиевую проволоку диаметром 0,5 мм, плотно намотанную на эмалированный электрод. Проток газа через зону разряда обеспечивался с помощью диэлектрического кожуха, внутренняя кромка ко-

торого отстояла от проволоки на 2,5 мм. «Активная» площадь ГО, т.е. площадь барьера, на которой возможно развитие разряда, в обоих случаях была одинакова.

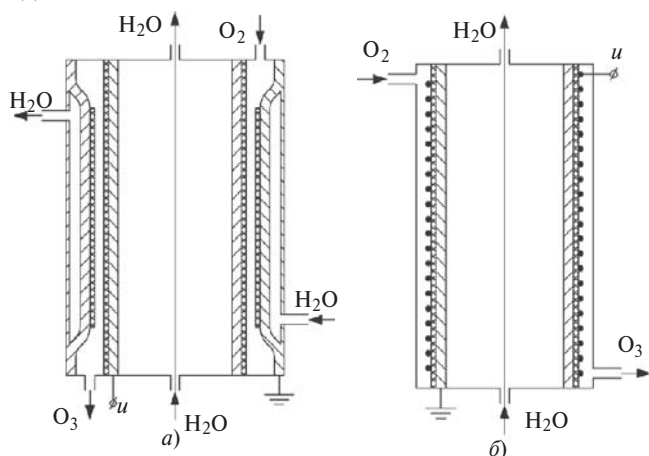


Рис. 1. Генераторы озона с объемным (а) и поверхностным (б) барьерными разрядами

Рабочим газом на протяжении всех экспериментов служил кислород от медицинского концентратора с точкой росы не выше  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Расход кислорода измерялся поплавковым ротаметром, а концентрация озона – приборами ВМТ 961 фирмы Ozonia и 245/5 Медозон. Охлаждение осуществлялось водопроводной водой при ее расходе не менее 2 л/мин. Мощность, потребляемая ГО от источника питания (ИП), измерялась путем интегрирования произведения мгновенных значений тока через ГО и напряжения на его обкладках с применением цифрового запоминающего осциллографа Tektronix TDS 3012. Напряжение и ток регистрировались с помощью специально изготовленных «безындуктивных» измерительных элементов – емкостного делителя и активного шунта соответственно.

На рис. 2 представлены зависимости энергозатрат ( $\mathcal{E}$ ) на синтез озона от его концентрации для озонаторов с ПБР и ОБР. Для озонатора с ОБР зависимости получены для случаев охлаждения обоих электродов и только внутреннего (высоковольтного). Частота питающего напряжения в каждом случае  $\mathcal{E}$ , кВт·ч/кг

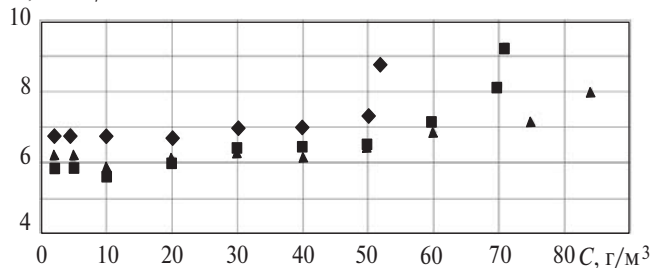


Рис. 2. Зависимость энергозатрат на синтез озона от его концентрации в генераторах озона с объемным и поверхностным барьерными разрядами: ◆ – ГО с ПБР; ■ – ГО с ОБР (одностороннее охлаждение); ▲ – ГО с ОБР (двустороннее охлаждение)

чае равнялась 16 кГц, расход кислорода 5 л/мин. Из рисунка 2 видно, что зависимости имеют общий характер: энергозатраты практически неизменны до определенного значения концентрации ( $C_{кр}$ ), а затем начинают резко возрастать. Значение это для трех испытуемых образцов разное: для первого оно равно  $50\text{ г/м}^3$ , для второго  $60\text{ г/м}^3$ , для третьего  $75\text{ г/м}^3$ . Рост энергозатрат можно объяснить возрастающим влиянием тепловых процессов на разложение озона, что подтверждает разница в значениях  $C_{кр}$  при отсутствии охлаждения внешнего электрода и при наличии его в ГО с ОБР.

При концентрации менее  $50\text{ г/м}^3$  энергозатраты в ПБР и ОБР можно считать неизменными и близкими по значению. Это позволяет утверждать, что для получения озона в этом интервале концентраций ОБР и ПБР энергетически эквивалентны. Технологически же, как упоминалось выше, ГО с ПБР гораздо проще, а следовательно, экономически выгоднее. Отсутствуют проблемы с равномерностью разрядного промежутка, с охлаждением водой элементов конструкции, находящихся под напряжением. Небольшую разницу в энергозатратах можно объяснить тем, что единичный барьерный микро-разряд состоит из двух стадий: канал в газе и ветвление по поверхности. В ОБР выражена более явно первая стадия, в ПБР – вторая, и в том, и другом случаях присутствуют обе. В [2, 3] показано существование двух стадий микро-разряда в ПБР теоретически, экспериментально и с помощью компьютерного моделирования.

Так как применение озонаторов на основе ПБР для получения озона с  $C < 50\text{ г/м}^3$  оправдано и целесообразно, во второй части работы была проведена оценка влияния некоторых конструктивных и технологических параметров ГО на уровень эффективности синтеза озона.

Влияние диаметра проволоки оценивалось в ГО, изображенном на рис. 1, б. Помимо испытанного ранее диаметра 0,5 мм, испытывались ГО с высоковольтным электродом из проволоки диаметром 0,1 и 2 мм. Все прочие параметры оставались прежними. На рис. 3 показана зависимость  $\mathcal{E}(C)$  для трех различных диаметров проволоки. Видно, что с увеличением диаметра растет значение  $C_{кр}$  и снижаются значения  $\mathcal{E}$ . Это можно объяснить увеличением доли нормальной составляющей в векторе напряженности поля, следовательно, увеличением длины канала разряда в газе. Можно считать, что с увеличением диаметра проволоки вид разряда приближается к ОБР, это подтверждает след на поверхности стеклоэмали. Заметно также существование зоны, свободной от следа около металла электрода, т.е. зоны, где разряд развивается в газе. При диаметре проволоки 2 мм длина зоны примерно 1 мм, при 0,1 мм – около 0,3 мм.

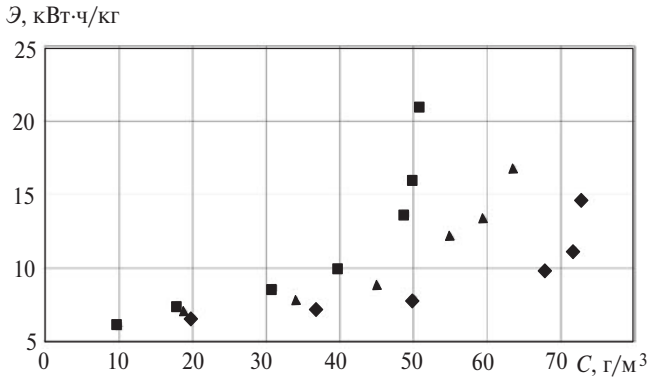


Рис. 3. Зависимость энергозатрат на синтез озона от его концентрации в генераторах озона с поверхностным барьерным разрядом при различных диаметрах высоковольтного электрода:  $\blacklozenge$  – 2 мм;  $\blacksquare$  – 0,5 мм;  $\blacktriangle$  – 0,1 мм

Влияние частоты питающего напряжения показано на рис. 4. Кривые относятся к ГО, изображенному на рис. 1,б, диаметр проволоки 2 мм. Видно, что Э слабо зависят от частоты питающего напряжения при ее значениях от 2 до 20 кГц. При частоте 30 кГц наблюдается резкий скачок энергозатрат. Стоит сказать, что при расчете Э учитывались диэлектрические потери в барьере, поэтому наблюдаемый скачок объяснить их ростом нельзя. Подобные результаты были получены в случае ОБР, когда также наблюдалось заметное увеличение энергозатрат при достижении частоты питающего напряжения 30 кГц.

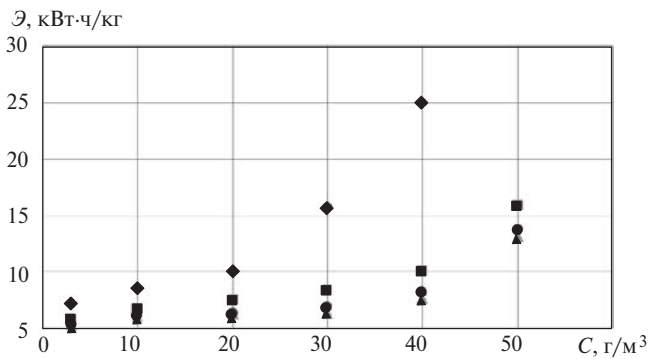


Рис. 4. Зависимость энергозатрат на синтез озона от его концентрации в генераторах озона с поверхностным барьерным разрядом при различных значениях частоты питающего напряжения:  $\blacklozenge$  – 30 кГц;  $\blacksquare$  – 15 кГц;  $\bullet$  – 5 кГц;  $\blacktriangle$  – 2 кГц

Влияние газового зазора оценивалось в ячейке, сделанной на основе керамических пластин (22ХС) толщиной 1 мм и размером 30×40 мм. На одну из них были нанесены электроды в виде тонкого металлического слоя толщиной 30–50 мкм, с которых развивался разряд. Рабочая площадь разряда составляла примерно 20 см<sup>2</sup>. Вторая пластина помещалась над первой и служила для образования канала для протока газа, в ряде случаев она была покрыта такими же электродами, что и первая, и на

них тоже подавалось напряжение. Пластины охлаждались проточной водой. Результаты экспериментов приведены на рис. 5. Видно, что увеличение зазора в 10 раз при том же объемном расходе газа, т.е. уменьшении скорости на порядок, не приводит к существенному изменению энергозатрат. Стоит отметить, что использование пластин с электродами с двух сторон ведет к увеличению максимальной концентрации и производительности ГО, однако энергозатраты при этом сильно возрастают.

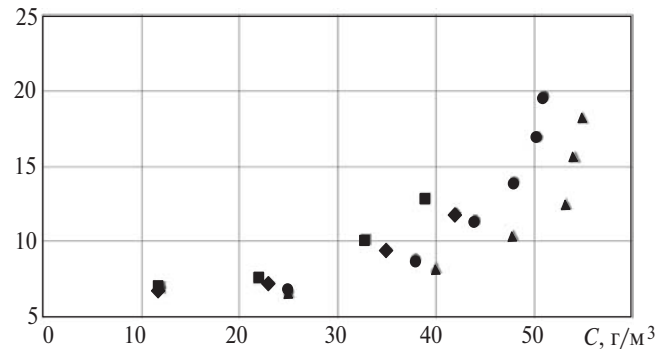


Рис. 5. Зависимость энергозатрат на синтез озона в ОБР при различных величинах газовых промежутков: одна пластина ( $\blacklozenge$  – 10 мм,  $\blacksquare$  – 1 мм); две пластины ( $\bullet$  – 4 мм,  $\blacktriangle$  – 10 мм)

Считается, что температура охлаждающей воды должна быть минимально возможной. Некоторые производители даже используют специальные хладагенты для отвода тепла из зоны разряда. Действительно, известно, что разложение озона при высокой температуре окружающей среды интенсифицируется, а при достижении 200 °С [4] озон разлагается полностью. Понятно, что превышение этой температуры приводит к отсутствию озона на выходе из ГО, но насколько захлаживание воды в диапазоне 4, 30 °С (диапазоне возможных температур водопроводной воды) влияет на эффективность синтеза озона, достоверно неизвестно. Различные работы приводят взаимоисключающие данные [4]. На рис. 6,а и б показаны зависимости Э(С) для ГО, изображенного на рис. 1 при различной температуре охлаждающей воды.

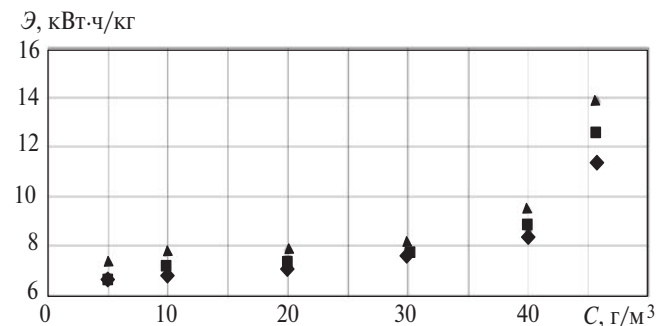


Рис. 6. Зависимость энергозатрат на синтез озона в ОБР и ПБР при различной температуре охлаждающей воды:  $\blacklozenge$  – 4 °С;  $\blacksquare$  – 9 °С;  $\blacktriangle$  – 25 °С

Видно, что влияние температуры воды в испытанном диапазоне практически отсутствует. Можно утверждать, что для получения озона концентрацией до  $50 \text{ г/м}^3$  можно использовать обычную водопроводную воду.

**Вывод.** Для получения озона концентрацией до  $50 \text{ г/м}^3$  озонаторы на ОБР и ПБР энергетически идентичны, а вторые даже предпочтительнее за счет простоты конструкции. Для эффективного синтеза озона в описанной конструкции целесообразно выбирать частоту питающего напряжения 2, 20 кГц, диаметр коронирующей проволоки 1, 2 мм. Газовый зазор и температура охлаждающей воды при ПБР не играют заметной роли в диапазонах 1, 10 мм и 4, 30 °С соответственно.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лунин В.В., Карягин Н.В., Ткаченко С.Н., Самойлович В.Г. Способы получения озона и современные конструкции озонаторов. — М.: МАКС Пресс, 2008.
2. Аронов М.А., Кокуркин М.П. Определение начальных напряжений поверхностного разряда в воздухе. — Сб. материалов Всесоюзной конф. «Физика диэлектриков и перспективы ее развития», Ленинград, 1972, т. 2.
3. Соловьев В.Р., Кончаков А.М., Кривцов В.М., Александров Н.Л. Численное моделирование поверхностного барьерного разряда в воздухе. — Физика плазмы, 2008, т. 34, №7.
4. Филиппов Ю.В., Вобликова В.А., Пантелеев В.И. Электросинтез озона. — М.: Изд-во МГУ, 1987.

*А в т о р ы : Лысов Николай Юрьевич окончил Институт электроэнергетики Московского энергетического института (МЭИ) в 2008 г. Ассистент кафедры ТЭВН МЭИ.*

*Пашин Михаил Михайлович окончил электроэнергетический факультет МЭИ 1962 г. Защитил кандидатскую диссертацию по специальности «Техника высоких напряжений» в 1968 г. Ведущий научный сотрудник ФГУП ВЭИ.*