

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ХИМИЧЕСКОЙ КИНЕТИКИ ОЗОНИРУЕМОГО ГАЗА ПРИ УЧЕТЕ ЯВЛЕНИЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ, ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА И ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

В статье рассматривается кинетика образования озона в поле коронного разряда с учетом кинематических и тепловых полей. Показано, что при турбулентных режимах течения можно в десять раз увеличить расход озона.

Практика конструирования барьерных озонаторов повышенной производительности и надежности привела к принципу применения турбулентного потока озонируемого газа (воздуха или другой кислородсодержащей смеси) при многократной его циркуляции через зону коронного разряда [4]. При этом экспериментально было обнаружено явление самоочищения диэлектрических барьеров озонатора в отличие от озонаторов, работающих в ламинарном режиме, требующих регулярной промывки диэлектрических барьеров. Переход на турбулентный режим течения газа на порядок увеличивает коэффициент теплопередачи между озонируемым газом и электродами озонатора. Это обстоятельство открывает новые возможности в различных конструкторских решениях по схемам: озонируемый газ заодно теплоноситель, охлаждение озонатора по специальным воздушным каналам, охлаждение повышенной интенсивности при помощи вакуумного кипения жидкого хладагента.

Высокое напряжение на электродах озонатора, узость зазоров в его разрядных промежутках при сильной пространственной неоднородности физико-химических явлений затрудняют экспериментальные исследования непосредственно в зоне разряда. По этой причине строится математическая модель этих явлений. Кроме вышеупомянутых условий математическая модель должна учитывать существенные потери образующегося озона на окисление азота и доокисление низших окислов азота до его пятиоксида, ибо при высоких удельных энергиях разряда происходит значительная активация азота [1, 2].

Таким образом, для объемной концентрации озона $C_{O_3}(y)$ в сечении разрядного промежутка y (рис. 1) предложено уравнение

$$C_{O_3}(y) = \alpha C(y) - C_N \left(1 - e^{-\frac{qy}{VP_N}}\right). \quad (1)$$

Здесь $C(y)$ – объемная концентрация синтезируемого озона из кислорода воздуха без влияния азота, q – объемная плотность мощности электрического разряда, V – среднее значение продольной составляющей скорости течения газа, α – коэф-

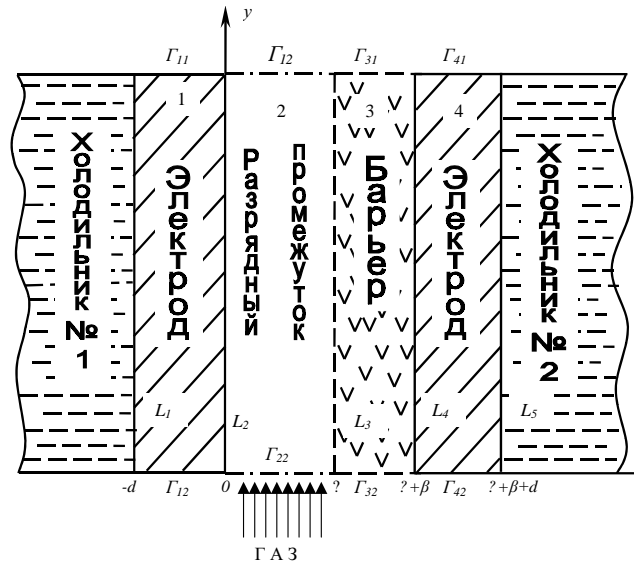


Рисунок 1. Схема расположения элементов озонатора для расчета поля температуры

фициент сенсibiliзирующего влияния азота [5], $1/P_N$ – обобщенная константа разложения окислов азота, C_N – отношение константы образования низших окислов азота к константе их разложения (дальнейшее согласование модели с экспериментом определило приближенно следующие значения этих параметров: $\alpha = 1,5$; $P_N = 3,2 \cdot 10^7$; $C_N = 0,49$).

Для расчета величины $C(y)$ используется в соответствии с [3] выражение

$$C(y) = \frac{q}{V} \int_0^y k_0(T(\eta)) e^{-\frac{q}{V} \int_{\eta}^y k_1(T(\eta)) d\eta} d\eta, \quad (2)$$

где $k_0(T(\eta))$ и $k_1(T(\eta))$ – зависимости констант, соответственно, образования и разложения озона от температуры $T(\eta)$ в точке с ординатой η .

Необходимая для (2) температура газа по пути следования частиц газа в разрядном промежутке в модели находится по уравнению теплового баланса в виде:

$$\lambda_{\Gamma} \frac{d^2 T_{\Gamma}}{dy^2} - \rho c_p V \frac{dT_{\Gamma}}{dy} = -q_{\Gamma}. \quad (3)$$

Здесь λ_{Γ} – коэффициент теплопроводности газа, ρ – его плотность массы, c_p – удельная тепло-

емкость газа при постоянном давлении, q_T – объемная плотность мощности тепловыделения в газе.

Уравнение (3) решается в совокупности уравнениями теплопроводности для твердых сред (электродов и барьера) и с учетом исходной температуры газа, граничных условий равенства тепловых потоков на границах между средами и пренебрежимой малости отвода тепла через торцы электродов и барьера.

Сравнение показывает, что среднеквадратическое отклонение расчетов на построенной модели от результатов экспериментов в 5-6 раз меньше, чем соответствующее отклонение расчетов по уравнению Васильева С.С., Кобозева Н.И., Еремина Е.Н. [1, 2]. Таким образом, получено значительное улучшение существующей модели.

На модели проведен анализ зависимостей выходных характеристик озонатора (концентрации озона и производительности озонатора) от задаваемых его параметров (рис. 2-5). Так, при изменении расстояния между электродами (рис. 2), частоты переменного тока (рис. 3) изменяются энергетические характеристики озонатора и, соответственно, температурные условия в разрядной зоне, а все в совокупности влечет изменения концентрации. Кроме того, изменение исходной температуры газа (рис. 4) влияет на положение максимальной концентрации озона.

Данные расчетов свидетельствуют о наличии максимумов концентрации при изменении входных параметров озонатора, что позволяет решать соответствующие задачи оптимизации конструкций озонаторов.

На рис. 5 изображена в сравнении зависимость производительности озонатора при ламинарном (а: $V_{cp} = 1$ м/с) и турбулентном (б: $V_{cp} = 20$ м/с) потоках газа. Здесь видно, что при турбулентном потоке воздуха можно добиться производительности озонатора в десятки раз более высокой, если соответственно повысить удельную мощность разряда. Однако при одном проходе воздуха через разрядный промежуток с высокой скоростью в нем образуется озон невысокой концентрации, поэтому при необходимости повысить концентрацию применяется многократное пропускание газа через разрядный промежуток.

Выводы:

1. Построенная модель позволяет адекватно учитывать влияние изменения поля температуры в зависимости от расхода газа и мощности разряда не только качественно, но и количественно, а также учитывает влияние способа и интенсивности охлаждения озонатора.

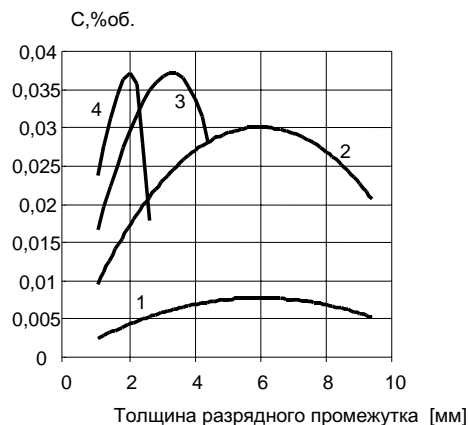


Рисунок 2. Зависимость объемной концентрации озона от толщины разрядного промежутка при различных частотах переменного тока: (1) - 100 Гц; (2) - 400 Гц; (3) - 700 Гц; (4) - 1000 Гц. Охлаждения электродов нет.

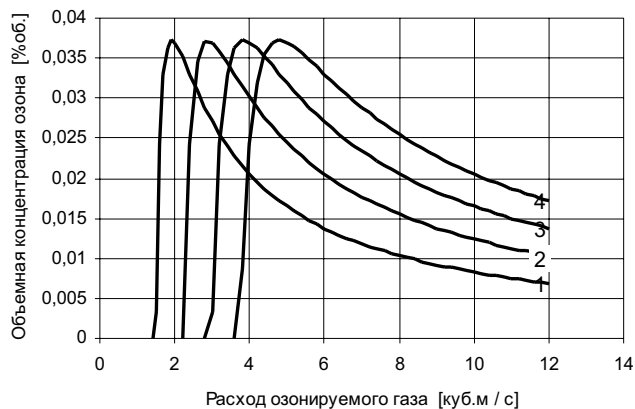


Рисунок 3. Зависимость объемной концентрации озона от расхода газа при различных частотах переменного тока у неохлаждаемого озонатора (толщина разрядного промежутка – 4 мм): 1 – 100 Гц; 2 – 400 Гц; 3 – 700 Гц; 4 – 1000 Гц

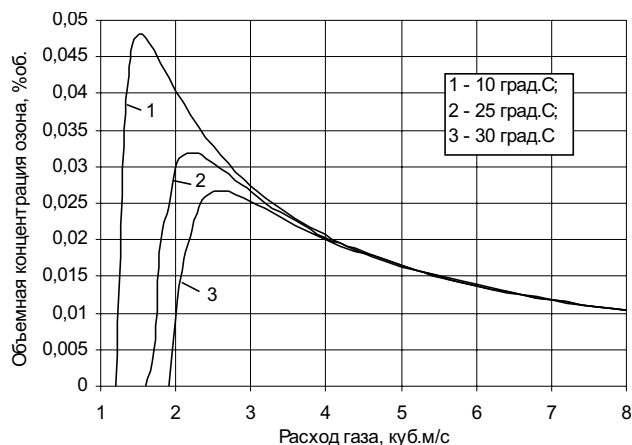


Рисунок 4. Зависимость объемной концентрации озона от расхода газа при различных его исходных температурах.

2. Модель отражает специфику ламинарного и турбулентного режимов течения газа в разрядном промежутке.

3. Модель позволяет решать оптимизационные задачи при конструировании озонаторов с ламинарными и турбулентными потоками озонируемого газа.

4. Модель позволила выяснить при турбулентном течении газа причину самоочищения разрядного промежутка озонатора от пятиоксида азота и выработать соответствующие рекомендации по организации режима энергетической нагрузки и охлаждения озонаторов.

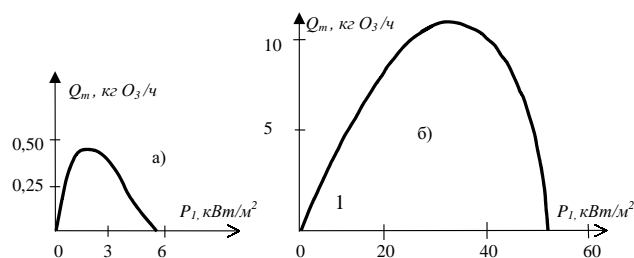


Рисунок 5. Сравнение зависимостей производительности озонатора от удельной мощности разряда при различных режимах течения воздуха в разряде: (а) – ламинарный режим; (б) – турбулентный режим.

Список использованной литературы:

1. Филиппов Ю.В., Вобликова В.А., Пантелеев В.И. Электросинтез озона. М., 1987. – 237 с.
2. Самойлович В.Г., Гибалов В.И., Козлов К.В. Физическая химия барьерного разряда. – М.: МГУ, 1989. – 175 с.
3. Кирко И.М., Кузнецов В.А. Математическое моделирование электросинтеза озона // Теоретические основы теплотехники: межвузовский сборник научных трудов. – Магнитогорск: Магнитогорский госуниверситет, Уральский государственный технический университет, 2000. – 17 с.
4. Кирко И.М., Кузнецов В.А. Ламинарный и турбулентный режим течения в плазме коронного разряда // Восьмой всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике (Пермь, 23-29 августа 2001 г.): Аннотации докладов. – Екатеринбург. – УрОРАН, 2001. – с. 322
5. Крапивина С.А. Плазмохимические технологические процессы. – Л.:Химия, 1981. – 248 с.