

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БАРЬЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОЗОНАТОРА БЕЗ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ

Построена, реализована и исследована математическая модель динамики характеристик барьерного электрического озонатора без системы принудительного охлаждения, учитывающая поле скоростей газа, тепловыделение в газе и на стенках разрядного промежутка. Проведенные на модели численные эксперименты хорошо согласуются с натурными экспериментами, позволяют исследовать динамику поля концентрации производимого озона и определять поведение производительности озонатора.

При расчетах производительности барьерных электрических озонаторов, работающих без охлаждения, в силу чувствительности озона к температурным условиям приходится учитывать их динамику во время работы аппарата. Исследованию возможности такого учета посвящена настоящая работа.

Большинство промышленных барьерных электрических озонаторов работают длительное время в установившемся режиме [1, 2], так как выделяющееся в барьерном электрическом разряде тепло, как правило, отводится мощной системой охлаждения водой. С одной стороны, это приводит к необходимости увеличивать размеры озонаторов, а с другой – требует строительства специальных помещений и оборудования для поддержания стабильного температурного режима. В тех случаях, когда указанные условия невозможно выполнить или озонатор не должен работать длительное время, возникает вопрос о возможностях использования озонаторов без системы принудительного охлаждения.

Изложенная проблема привела к необходимости исследования динамики физико-химических процессов и их характеристик в нагреваемом от электрического разряда озонаторе.

Поэтому задачей исследования являлось построение методики расчета оптимальных режимов работы барьерного электрического озонатора без системы принудительного охлаждения.

Решение поставленной задачи производится с помощью математической модели, в основу которой заложены:

– обобщенное кинетическое уравнение для расчета поля концентрации озона;

– гидродинамическое уравнение Навье – Стокса для расчета поля скоростей ламинарного течения газа;

– уравнение теплового баланса для расчета поля температуры в разрядном промежутке.

Модель процессов в барьерном электрическом озонаторе для рассматриваемого случая имеет следующие особенности. Промежуток времени, за который происходит существенное

изменение поля температуры в элементах озонатора (минуты), значительно превышает время пребывания частиц газа в разрядной зоне (секунды). Поэтому при расчете поля скоростей течения газа в разрядном промежутке в каждый момент времени в модели используется, как и в [3], стационарное гидродинамическое уравнение Навье – Стокса. Полученное поле скоростей в газе используется при моделировании поля концентрации озона. Но существенной особенностью рассматриваемого случая является температурная нестационарность этих полей.

Параметры модели «нагреваемого» озонатора содержат в отличие от построенной в [3] модели озонатора, работающего в стационарном режиме, дополнительно: коэффициенты теплоемкости барьера  $c^{(B)}$ , металлического электрода –  $c^{(M)}$ , плотность материала барьера –  $\rho_B$ , металла –  $\rho_M$  и начальную температуру озонатора  $T_H$ .

Зависящими от времени здесь становятся переменные величины модели: температура в элементах озонатора  $T_i(x, y, t)$  ( $i = 1, 2, 3$ ) (см. рис. 1), поле концентрации озона в разрядном промежутке  $C(x, y, t)$ , средняя интегральная концентрация озона в поперечном сечении разрядного промежутка  $C_{cp}(y, t)$  и средняя интегральная производительность этих сечений  $Q_m(y, t)$ . Дополнительной выходной характеристикой модели здесь вводится время ненулевой производительности озонатора и производительность по озону за один период его работы.

Расчет поля температуры в зазоре (зона 1 на рис. 1) в зависимости от времени работы озонатора производится с учетом влияния всех остальных зон по следующим уравнениям.

$$\begin{aligned} \text{Зона 1: } & \lambda_{\Gamma} \left( \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} \right) + q_{\Gamma} - \\ & - c_{\text{PГ}} \cdot \rho_{\Gamma} \cdot V_y(x, y, t) \frac{\partial T_1}{\partial y} = \rho_{\Gamma} \cdot c_{\text{PГ}} \frac{\partial T_1}{\partial t} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{Зона 2: } \lambda_B \left( \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} \right) = \rho_B \cdot c^{(B)} \frac{\partial T_2}{\partial t} \quad (2)$$

$$\text{Зоны 3: } \lambda_M \left( \frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial y^2} \right) = \rho_M \cdot c^{(M)} \frac{\partial T_3}{\partial t} \quad (3)$$

Граничные условия для поля температуры имеют вид (см. обознач. на рис. 1):  $T_1|_{\Gamma_{11}} = T_A$  – исходная температура газа;

$$\frac{\partial T_1}{\partial y} \Big|_{\Gamma_{12}} = \frac{\partial T_1}{\partial y} \Big|_{\Gamma_{22}} = \frac{\partial T_2}{\partial y} \Big|_{\Gamma_{21}} = \frac{\partial T_3}{\partial y} \Big|_{\Gamma_{31}} = \frac{\partial T_3}{\partial y} \Big|_{\Gamma_{32}} = 0 \quad (4)$$

$$T_1|_{L_2} = T_2|_{L_2} \quad T_2|_{L_3} = T_3|_{L_3} \quad T_3|_{L_4} = T_1|_{L_4}$$

$$\lambda_B \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{L_3} = \lambda_M \frac{\partial T_3}{\partial x} \Big|_{L_3} \quad \lambda_G \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{L_1} = \lambda_M \frac{\partial T_3}{\partial x} \Big|_{L_4} + q_{GM}^*$$

$$\lambda_B \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{L_2} = \lambda_G \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{L_2} + q_{GB}^*$$

Начальное условие:  $T_i(x; y; 0) = T_n$  ( $i=1, 2, 3$ ) – начальная температура озонатора до его включения. Здесь:  $T_i(x; y; t)$  – температура в точке ( $x; y$ )  $i$ -й зоны озонатора в момент времени  $t$ ;  $q_G$  – объемная плотность мощности выделения тепла в газе;  $q_{GB}^*$  – поверхностная плотность мощности источников тепла на границе газ-барьер;  $q_{GM}^*$  – поверхностная плотность мощности источников тепла на границе газ-металл;  $L_G, L_B, L_M$  – коэффициенты теплопроводности газа, барьера и металла.

Реализация модели проводилась численно и дала результаты, отклоняющиеся от контрольных натуральных экспериментов в пределах 5-13%.

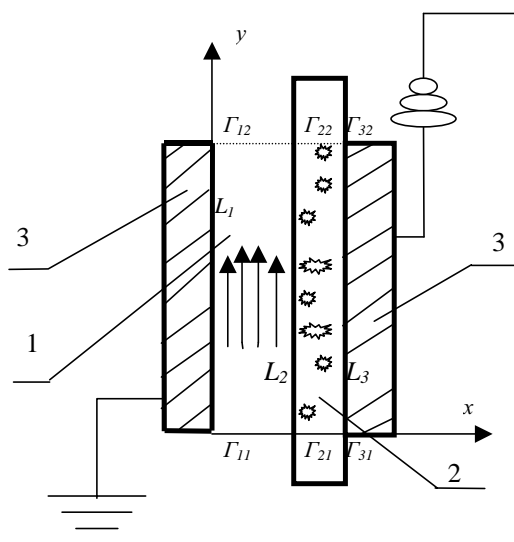


Рисунок 1. Схема разрядного промежутка барьерного электрического озонатора: 1 – разрядный промежуток; 2 – диэлектрический барьер; 3 – металлические электроды.

Расчеты на построенной модели дают зависимости от времени следующих величин: 1) распределение температуры в элементах озонатора; 2) распределение концентрации озона в разрядном промежутке озонатора; 3) производительность озонатора и сечений его разрядного промежутка в любой момент времени; 4) энергетический выход озона в любой момент времени; 5) производительность за один период работы; 6) время ненулевой производительности озонатора.

Далее приводятся результаты расчетов динамики выходных характеристик модели озонатора со следующими входными параметрами:

длина электродов	1 м;
общая площадь электродов	5 м <sup>2</sup> ;
ширина разрядного промежутка	3 мм;
толщина барьера (стекло)	2 мм;
толщина электродов (нерж.сталь)	5мм;
рабочее давление газа	0,16 МПа;
расход газа	10 м <sup>3</sup> /ч;
исходная температура озонатора	-10° С;
исходная температура газа	-10° С;
амплитуда подаваемого напряжения	24 кВ;
частота	50 Гц.

Сравнительно толстые электроды здесь выбраны умышленно для обеспечения запаса тепловой инерции в озонаторе при его предстоящем нагревании.

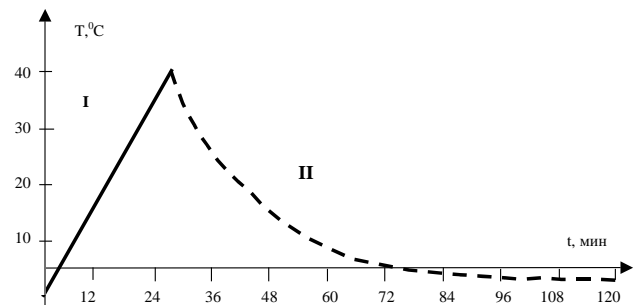


Рисунок 2. Зависимость средней температуры в разрядном промежутке озонатора (без системы охлаждения) от времени: I – режим производства озона (расход воздуха – 10 м<sup>3</sup>/ч); II – режим продувки при отключенном напряжении, расход воздуха – 100 м<sup>3</sup>/ч.

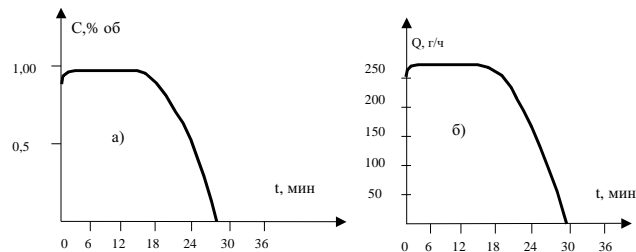


Рисунок 3. Зависимость от времени работы озонатора без принудительного охлаждения: а) концентрации озона; б) производительности озонатора.

Расчеты показали, что за 30 мин. работы такой озонатор нагревается в среднем до температуры  $44^{\circ}\text{C}$  (см. рис. 2). Концентрация озона при электросинтезе из воздуха держится примерно на одном уровне в течение 18 мин. (1% об.), а затем начинает резко падать и к 29-й минуте работы озонатора оказывается равной нулю (рис. 3а). Соответственно этому ведет себя и производительность озонатора – сначала 250-280 г/ч, а затем падение к нулю (рис. 3б). Энергетический выход озона удерживается 18 мин. примерно на уровне (22-19 мг/кДж), а затем быстро убывает к нулю.

Дальнейшее численное экспериментирование, проведенное на модели, показало, что для каждой конструкции озонатора такого типа, его условий работы и исходной температуры существует и может быть определен реальный временной промежуток, в течение которого возможна стабильная по производству озона работа озонатора.

Следует отметить, что расчет времени, необходимого для охлаждения озонатора (после периода его работы) продувкой воздуха при отключенном напряжении, может быть произведе-

ден при необходимости по тому же алгоритму, что и исходный расчет. Для этого требуется только соответствующее задание исходных данных. Так, по проведенным расчетам, для озонатора с параметрами приведенными выше, и расходом охлаждающего воздуха  $Q_v=100\text{ м}^3/\text{ч}$  для охлаждения барьера озонатора, имеющего исходную температуру  $t=40^{\circ}\text{C}$ , до средней температуры  $+3^{\circ}\text{C}$  требуется 63 мин. (рис. 2). А при расходе в  $500\text{ м}^3/\text{ч}$  за это же время барьер охладится до  $-9,5^{\circ}\text{C}$ .

В результате проведенного математического моделирования барьерного электрического озонатора с температурной динамикой подтверждена реальность предложенного циклического режима его работы и разработана методика расчета таких озонаторов без системы охлаждения.

Чередование промежутков работы таких озонаторов с промежутками охлаждения может стать полезной системой работы озонаторов в условиях, затрудняющих использование системы постоянного охлаждения аппаратов во время их работы.

#### Список использованной литературы:

1. Самойлович В.Г., Гибалов В.И., Козлов К.В. Физическая химия барьерного разряда. – М.: МГУ, 1989. – 175 с.
2. Филиппов Ю.В., Вобликова В.А., Пантелеев В.И. Электросинтез озона. М., 1987. – 237 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. – 17с.