

# Многофакторная математическая модель озонатора сотовой структуры\*

Исмагилов Ф.Р., Максудов Д.В.

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»

г. Уфа, Российская Федерация

[ifr@ugatu.ac.ru](mailto:ifr@ugatu.ac.ru), [maksudov.dv@ugatu.su](mailto:maksudov.dv@ugatu.su)

**Аннотация.** Представлена конструкция озонатора сотовой структуры. Проведено математическое моделирование данной конструкции озонатора, на базе которого выполнены численные эксперименты. Исследовано зависимость концентрации озона на выходе озонатора от различных параметров. Для верификации этих результатов проведены натурные экспериментальные исследования.

**Ключевые слова:** озонатор, газоразрядные процессы, численные методы, экспериментальные исследования.

## ВВЕДЕНИЕ

Высокие окислительные способности озона позволяют эффективно использовать его в различных технологических процессах, в том числе для дезинфекции (в медицине, санитарии, пищевой промышленности), для проведения различных химических реакций (в нефтяной, химической, целлюлозно-бумажной промышленности), в качестве окислителя для ракетного топлива, в качестве дезактивирующего агента в ядерной энергетике и т.д. [1-6].

В тоже время препятствием для широкого внедрения озонных технологий является высокая удельная себестоимость и энергоёмкость процесса получения озона.

В связи с этим представляется весьма актуальным решение задачи оптимизации конструкции озонаторов по критерию снижения удельной энергоёмкости генерации озона.

Решение данной задачи осложняется тем, что на эффективность образования озона оказывают влияние большое количество взаимозависимых параметров: температура, давление, состав газа и скорость его потока [7-11], форма электродов и диэлектрического барьера [12, 13], плотность мощности барьерного разряда [7, 8], амплитуда питающего напряжения [14] и др.

Таким образом, возникает необходимость в разработке математической модели физических процессов, протекающих в озонаторе, которая могла бы учесть влияние этих параметров друг на друга и на реакции образования и декомпозиции молекул озона [15].

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью работы являлась разработка математической модели физических процессов, протекающих в озонаторе, учитывающей влияние различных параметров как друг на друга, так и на эффективность образования озона.

Математическое моделирование и натурные экспериментальные исследования проводились для озонатора, разработанного на кафедре электромеханики УУНиТ, конструкция которого приведена на рис. 1.

Данная конструкция включает диэлектрический блок сотовой структуры 4, в каналы которого в шахматном порядке вложены группы электродов 5, 6, подключенные к источнику питания 7.

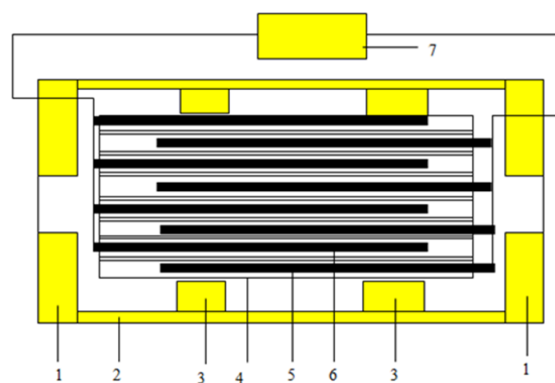
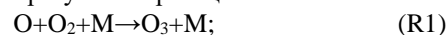


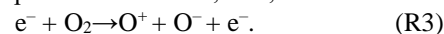
Рис. 1. Озонатор сотовой структуры в продольном разрезе: 1 – фланцы; 2 – диэлектрический корпус; 3 – изолирующие стойки; 4 – диэлектрик сотовой структуры; 5, 6 – группы электродов разных потенциалов; 7 – высокочастотный источник переменного тока

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Образование и разложение озона внутри озонатора происходит в основном в результате реакций



Эти реакции имеют энергию активации соответственно  $E_{1a} = 2,77$  кДж/моль;  $E_{2a} = 9,66$  кДж/моль, а участвующий в них атомарный кислород, возникает в барьерном разряде при столкновении молекул кислорода с электронами, имеющими энергию не менее 12,5 эВ,



С учетом (R1)-(R2) изменение концентрации озона определяется дифференциальным уравнением

$$\frac{d[O_3]}{dt} = K_1[O_2][O] - K_2[O_3][O], \quad (1)$$

где

$$K_1 = A_1 \exp\left(\frac{-E_{1a}}{RT}\right); \quad (2)$$

$$K_2 = A_2 \exp\left(\frac{-E_{2a}}{RT}\right), \quad (3)$$

\* Статья публикуется по рекомендации программного комитета Всероссийской научно-технической конференции "Пром-Инжиниринг", <https://icie-rus.org>

где  $[O]$ ,  $[O_3]$ ,  $[O_2]$  – соответственно, концентрация атомарного кислорода, озона и двухатомного молекулярного кислорода;  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль×К);  $T$  – температура, К;  $A_1, A_2$  – соответственно факторы частоты реакций (R1) и (R2).

Учитывая, что концентрация атомарного кислорода пропорциональна удельной мощности барьерного разряда уравнение (1) может быть переписано в виде

$$\frac{d[O_3]}{dt} = K'_1([O_2]_0 - [O_3]) - K'_2[O_3], \quad (4)$$

где

$$K'_1 = A_1 \exp\left(\frac{-E_{1a}}{RT}\right) K_0 \frac{P}{V}; \quad (5)$$

$$K'_2 = A_2 \exp\left(\frac{-E_{2a}}{RT}\right) K_0 \frac{P}{V}; \quad (6)$$

$P$  – активная мощность барьерного разряда, Вт;  $V$  – суммарный объем каналов диэлектрического блока, м<sup>3</sup>;  $[O_2]_0$  – начальная концентрация кислорода.

Баланс реакций образования и разложения озона зависит от температуры газовой смеси. При сравнительно малой скорости ее движения, когда отведение тепла, образующегося в процессе барьерного разряда, происходит главным образом через боковые стенки диэлектрического блока, изменение его температуры определяется уравнением

$$\frac{dT}{dt} = \frac{P - \Delta T \alpha S}{mC}, \quad (7)$$

где  $t$  – время, с;  $m$  – масса диэлектрического блока, кг;  $C$  – теплоемкость диэлектрика, Дж/(кг×К);  $S$  – площадь поверхности блока, м<sup>2</sup>;  $\alpha$  – коэффициент теплообмена между поверхностью блока и окружающим воздухом, Вт/(м<sup>2</sup>×К);  $\Delta T = T - T_0$  – относительная температура, т.е. разность между температурой блока  $T$  (распределение температуры внутри блока принимается равномерным по его объему) и температурой окружающей среды  $T_0$ , К.

Мощность барьерного разряда  $P$ , входящая в уравнение (7), зависит от частоты питающего напряжения  $f$ , количества серий микроразрядов на каждом его полупериоде  $n$ , энергии каждой такой серии  $E_s$  и числа ячеек диэлектрического блока озонатора  $N$

$$P = 2fnNE_s, \quad (8)$$

где

$$n = \frac{u_v - u_g}{u_{pr} - u_g}; \quad (9)$$

$$E_s = C_v (u_{pr}^2 - u_g^2); \quad (10)$$

$C_v$  – емкость газового промежутка ячейки;  $u_v$  – напряжение между электродом и диэлектрическим барьером ячейки озонатора, В;  $u_g$  – напряжение гашения барьерного разряда, В;  $u_{pr}$  – напряжение пробоя, В.

В соответствии с законом Пашена напряжения пробоя зависит от температуры газовой смеси и ее химического состава

$$u_{pr} = \frac{Bp\delta}{\ln\left(Ap\delta \left[\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)\right]^{-1}\right)}, \quad (11)$$

где  $\gamma$  – коэффициент вторичной электронной эмиссии;  $p$  – давление газа в ячейке, Па;  $A$  и  $B$  – константы, определяемая составом газа и энергией его ионизации

$$A = \frac{\pi \left(\sum_{i=1}^n r_i p_i\right)^2}{kT}; \quad (12a)$$

$$B = A \times \sum_{i=1}^n E_{ni} p_i, \quad (12b)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана;  $r_i$  и  $E_{ni}$  – соответственно радиус и энергия ионизации молекулы  $i$ -го химического соединения в газовой смеси, проходящей через озонатор;  $p_i$  – мольная доля  $i$ -го химического соединения в газе.

#### УЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТАВА ГАЗА

В процессе движения газовой смеси через каналы диэлектрического блока их состав изменяется вследствие химических реакций, протекающих под действием барьерного разряда, основными из которых являются реакции образования и разложения озона (R1) и (R2). Пренебрегая прочими реакциями в соответствии с (1)-(6) изменение концентрации озона во время движения газовой смеси через канал

$$\frac{d[O_3]}{dt} = K_0 \frac{P}{V} \begin{pmatrix} A_1 \exp\left(\frac{-E_{1a}}{RT}\right) ([O_2]_0 - [O_3]) \\ -A_2 \exp\left(\frac{-E_{2a}}{RT}\right) [O_3] \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Как было показано выше, температура  $T$  и мощность барьерного разряда  $P$ , входящие в правую часть уравнения (13), являются функциями от координаты  $x$  (ось  $ox$  направлена вдоль каналов), а, следовательно, и функциями от времени.

Если допустить, что движение газовой смеси вдоль оси  $ox$  происходит с равномерной скоростью и длина канала  $L$  разбита на  $n$  интервалов  $\Delta x$ , то данная газовая смесь достигнет некий  $i$ -й интервал спустя время

$$t = \frac{S_{сеч} \Delta x}{Q/N} = \left(\frac{h - D_d (\sqrt{N} + 1)}{\sqrt{N}}\right)^2 \frac{3600LiN}{Qn} \quad (14)$$

после момента вхождения в канал, где  $N$  – полное число каналов диэлектрического блока;  $Q$  – объемный расход потока газа, м<sup>3</sup>/час;  $h$  – длина/ширина блока, м;  $D_d$  – толщина диэлектрических стенок между каналами, м;  $S_{сеч}$  – площадь поперечного сечения канала, м<sup>2</sup>.

Время, за которое газовая смесь пройдет  $i$ -й интервал длины канала, соответственно

$$\Delta t = \frac{S_{сеч} \Delta x}{Q/3600N} = \left(\frac{h - D_d (\sqrt{N} + 1)}{\sqrt{N}}\right)^2 \frac{3600LN}{Qn}. \quad (15)$$

Например, при параметрах озонатора, приведенных в таблице 1 и при  $n = 150$  время  $\Delta t \approx 0,1$  с.

При переходе от бесконечно малых интервалов времени  $dt$  к конечным интервалам  $\Delta t$ , определяемым по формуле (15), уравнение (13) может быть переписано в виде  $\Delta[O_3]_i =$

$$= K_0 \frac{P(T_i, [O_3]_{i-1})}{V} \left( \begin{array}{l} A_1 \exp\left(\frac{-E_{1a}}{RT_i}\right) ([O_2]_0 - [O_3]_{i-1}) - \\ - A_2 \exp\left(\frac{-E_{2a}}{RT_i}\right) [O_3]_{i-1} \end{array} \right) \Delta t, \quad (16)$$

где  $\Delta[O_3]_i$  – приращение концентрации озона на  $i$ -м интервале;  $[O_3]_{i-1}$  – концентрация озона на предыдущем,  $(i-1)$ -м интервале;  $T_i$  – температура на  $i$ -м интервале, определяющая также мощность барьерного разряда на данном интервале. Следует отметить, что в соответствии с (1)-(13) мощность барьерного разряда зависит не только от температуры, но и от состава газа, т.е. в том числе и от меняющейся концентрации озона.

От состава газа зависят и тепловые сопротивления вследствие зависимости коэффициента теплоотдачи при принудительной конвекции  $\alpha$  от молярной массы газа и среднего эффективного диаметра его молекул

С учетом (16) распределение температуры и концентрации озона в каналах диэлектрического блока может быть найдено в результате итерационного процесса

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{0,j} = T_c; \\ [O_3]_{0,j} = 0; \\ R_{\text{общ}}(T_{i-1,j}, [O_3]_{i-1,j}) = \\ = \begin{cases} R_{\text{вн}}(T_{i-1,j}, [O_3]_{i-1,j}) + R_{\text{д}} + R_{\text{н}}(T_{i-1,j}) & \text{для } j = 0; \\ 2R_{\text{вн}}(T_{i-1,j}, [O_3]_{i-1,j}) + R_{\text{д}} & \text{для } j > 0; \end{cases} \\ \Delta T_{i,j} = \frac{3600}{Q \rho_{\Gamma} C_{\Gamma}} \frac{P(T_{i-1,j}, [O_3]_{i-1,j}) \frac{\Delta x}{L} - R_{\text{общ}}(T_{i-1,j}, [O_3]_{i-1,j})}{\frac{T_{i-1,j} - T_{i-1,j-1}}{R_{\text{эл}\Sigma}(T_{i-1,j}, [O_3]_{i-1,j})} - \frac{T_{i-1,j} - T_c}{R_{\text{эл}\Sigma}(T_{i-1,j}, [O_3]_{i-1,j})}}; \\ \Delta[O_3]_{i,j} = K_0 \frac{P(T_{i-1,j}, [O_3]_{i-1,j})}{V} \times \\ \times \left( \begin{array}{l} A_1 \exp\left(\frac{-E_{1a}}{RT_{i-1,j}}\right) ([O_2]_0 - [O_3]_{i-1,j}) - \\ - A_2 \exp\left(\frac{-E_{2a}}{RT_{i-1,j}}\right) [O_3]_{i-1,j} \end{array} \right) \Delta t; \\ T_{i,j} = T_{i-1,j} + \Delta T_{i,j}; \\ [O_3]_{i,j} = [O_3]_{i-1,j} + \Delta[O_3]_{i,j}, \end{array} \right. \quad (17)$$

где  $R_{\text{вн}}$  – сопротивление переходу тепла на внутренней поверхности канала (теплопередачи при принужденной конвекции вследствие движения потока газа через канал);  $R_{\text{н}}$  –

сопротивление переходу тепла на наружной поверхности блока (теплопередачи при естественной конвекции);  $R_{\text{д}}$  – тепловое сопротивление слоя диэлектрика. Данные сопротивления могут быть найдены из формул (18)

$$R_{\text{вн}}(T_{i-1,j}, [O_3]_{i-1,j}) = \frac{1}{\alpha_{\text{пк}}(T_{i-1,j}, [O_3]_{i-1,j}) S}; \quad (18)$$

$$R_{\text{д}} = \frac{D_{\text{д}}}{\lambda_{\text{д}} S}; \quad R_{\text{н}}(T_{i-1,j}) = \frac{1}{\alpha_{\text{ек}}(T_{i-1,j}) S};$$

где  $S$  – площадь теплообмена,  $\alpha_{\text{пк}}$  – коэффициент теплообмена для случая охлаждения газа при принудительной конвекции, а  $\alpha_{\text{ек(г)}}$  и  $\alpha_{\text{ек(в)}}$  – соответственно коэффициенты при естественной конвекции возле горизонтальной и вертикальной внешних поверхностей диэлектрического блока, которые могут быть представлены как функции от температуры  $T$ , давления  $p$ , теплоемкости  $C$ , молярной массы  $M$  газа, эффективного диаметра его молекул  $d$ , объемного расхода потока  $Q$  и диаметра канала  $D$ , по которому данный поток проходит,

$$\alpha_{\text{пк}}(T_{i-1,j}, [O_3]_{i-1,j}) = 0,023 \frac{ik\sqrt{R}}{3\pi^{3/2}D} \sqrt{\left(\frac{\sqrt{6\pi pD}}{\sqrt{RkS}}\right)^4 \left(\frac{\sqrt{3\pi/2C}}{iR}\right)^{0.3}} \times (T_{i-1,j})^{-0.7} Q^{0.8} d^{-0.4} ([O_3]_{i-1,j}) M^{0.2} ([O_3]_{i-1,j}), \quad (19)$$

$$\alpha_{\text{ек(г)}}(T_{i-1,0}) = 0,54 \frac{i^{3/4} \sqrt{pk}}{3\pi^{7/8} d \sqrt{T_{i-1,0}}} \times \sqrt{\frac{\sqrt{54} g C \Delta T}{L}}; \quad (20)$$

$$\alpha_{\text{ек(в)}}(T_{i-1,j}) = \frac{ik}{3\pi^{3/2} d^2 L} \sqrt{\frac{RT_{i-1,j}}{M}} \times \left( \begin{array}{l} 0,67 d^4 \sqrt{\frac{\sqrt{54} \pi^{5/2} g \Delta T L^3 C \left(\frac{pM}{R}\right)^2}{ik^2}} \\ 0,68 + \frac{T_{i-1,j}}{\left[ 1 + \frac{0,492 ik}{3\pi^{3/2}} \frac{kT}{\sqrt{6\pi p} RT_{i-1,j}} \frac{pM}{C} \right]^{9/16} 7^{4/9}} \end{array} \right), \quad (21)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана;  $i$  – число степеней свободы молекул газа;  $g$  – ускорение свободного падения,  $m/c^2$ ;  $L$  – характерный размер, м;  $\Delta T$  – разность температур между нагретой стенкой и внешней охлаждающей средой.

Если на входе в канал газ представляет собой чистый кислород, то по мере движения газовой смеси через данный канал ее состав представляет собой смесь кислорода с озоном, образовавшимся в результате барьерного разряда, причем для любого интервала

$$[O_3]_i + [O_2]_i = [O_2]_0 = 1. \quad (22)$$

С учетом (22) зависимости для молярной массы и среднего эффективного диаметра молекул, входящие в формулы (19)-(21)

$$d([O_3]_{i-1}) = d_{O_2}(1 - [O_3]_{i-1}) + d_{O_3}([O_3]_{i-1}); \quad (23)$$

$$M([O_3]_{i-1}) = M_{O_2}(1 - [O_3]_{i-1}) + M_{O_3}([O_3]_{i-1}), \quad (24)$$

где  $d_{O_2}$  и  $M_{O_2}$  – соответственно диаметр молекул и молярная масса кислорода;  $d_{O_3}$  и  $M_{O_3}$  – соответственно диаметр молекул и молярная масса озона.

В общем случае для многокомпонентной газовой смеси выражения (23) и (24) имеют вид

$$d([O_3]_{i-1,j}) = \sum_{k=1}^n (d_{X_k} [X_k]_{i-1,j}) + d_{O_2} ([O_2]_0 - [O_3]_{i-1,j}) + d_{O_3} ([O_3]_{i-1,j}); \quad (25)$$

$$M([O_3]_{i-1,j}) = \sum_{k=1}^n (M_{X_k} [X_k]_{i-1,j}) + M_{O_2} ([O_2]_0 - [O_3]_{i-1,j}) + M_{O_3} ([O_3]_{i-1,j}), \quad (26)$$

где  $[X]_k$  – концентрация  $k$ -го компонента газовой смеси;  $d_{X_k}$  – диаметр молекул  $k$ -го компонента;  $M_{X_k}$  – молярная масса  $k$ -го компонента;  $n$  – число газов, входящих в состав смеси (кроме кислорода и озона);  $[O_2]_0$  – начальная концентрация кислорода в газовой смеси.

В частности, для воздуха (считая его начальный состав смесью только кислорода и азота)

$$d([O_3]_{i-1,j}) = d_{N_2} ([N_2]_0) + d_{O_2} ([O_2]_0 - [O_3]_{i-1,j}) + d_{O_3} ([O_3]_{i-1,j}); \quad (27)$$

$$M([O_3]_{i-1,j}) = M_{N_2} ([N_2]_0) + M_{O_2} ([O_2]_0 - [O_3]_{i-1,j}) + M_{O_3} ([O_3]_{i-1,j}), \quad (28)$$

где  $d_{N_2}$  и  $M_{N_2}$  – соответственно диаметр молекул и молярная масса азота.

#### ЗАВИСИМОСТЬ КОНЦЕНТРАЦИИ ОЗОНА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ВХОДЯЩЕЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ

Как следует из уравнений системы (1)-(13) эффективность образования озона зависит от удельной мощности барьерного разряда  $P/V$ , Вт/м<sup>3</sup>. Однако, в тоже время, с ростом удельной мощности растет температура газовой смеси, что приводит к изменению баланса между реакциями образования и разложения озона. При повышении температуры реакция разложения озона существенно ускоряется, и, следовательно, если удельная мощность превышает некоторое критическое значение, то дальнейший ее рост приводит к снижению концентрации озона, как это показано на рис. 2.

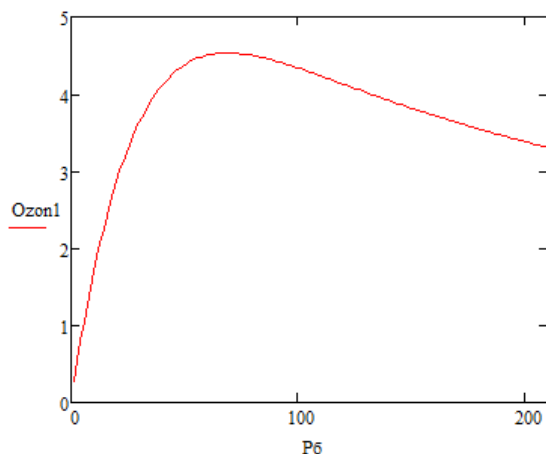


Рис. 2. Зависимости концентрации озона (%) в газовой смеси в момент ее выхода из озонатора от мощности барьерного разряда  $P_6$  (Вт)

Кривая, показанная на данном рисунке, получена в соответствии с (17) при объемном расходе потока газа  $Q = 0,03$  м<sup>3</sup>/с и прочих параметрах озонатора, приведенных в табл. 1.

Таблица 1

Параметры озонатора	
Параметр	Значение
Длина диэлектрического блока $l$ , м	0,15
Высота/ширина диэлектрического блока $h$ , м	0,07
Число каналов $N$	225
Толщина слоя диэлектрика $D_d$ , м	$10^{-3}$
Напряжение источника питания $U_0$ , кВ	15
Частота тока $f$ , Гц	200
Давление $p$ , Па	$10^5$
Теплопроводность диэлектрика $\lambda_d$ , Вт/(м×К)	30
Теплопроводность электрода $\lambda_э$ , Вт/(м×К)	47
Объемный расход потока газа $Q$ , м <sup>3</sup> /с	0,09

В связи с этим представляет интерес применение различных способов охлаждения газовой смеси в разрядном промежутке для сохранения высокой концентрации озона в момент выхода газовой смеси из озонатора.

Одним из таких способов является охлаждение газовой смеси перед входом в каналы диэлектрического блока. Для определения распределения температуры и концентрации озона вдоль длины канала диэлектрического блока итерационный процесс (17) должен быть изменен с учетом того, что начальная температура газовой смеси  $T_{r0}$  для любого  $j$ -го слоя каналов теперь отличается от температуры окружающей среды  $T_c$  и вследствие этого первое уравнение в (17) должно быть переписано в виде

$$T_{0,j} = T_{r0}. \quad (29)$$

На рис. 3 показаны результаты вычисления зависимости концентрации озона на выходе из каналов диэлектрического блока от начальной температуры газовой смеси  $T_{r0}$  при температуре окружающей среды  $T_c = 300$  К, объемном расходе потока газа  $Q = 0,03$  м<sup>3</sup>/с и прочих параметрах озонатора, приведенных в табл. 1. Данные вычисления проведены согласно (17) с учетом (29).

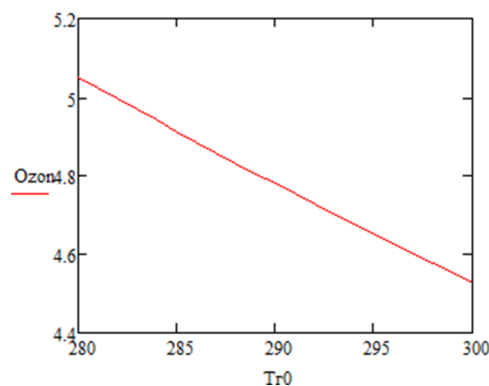


Рис. 3. Зависимости концентрации озона (%) от начальной температуры газовой смеси  $T_{r0}$  (К)

Как видно из данного рисунка предварительное охлаждение газовой смеси позволяет существенно повысить концентрацию озона.

Кроме того, различные значения исходной температуры газовой смеси приводит к некоторому смещению максимума кривой, показывающей зависимость концентрации озона на выходе канала диэлектрического блока от мощности барьерного разряда, так как это показано на рис. 4 для озонатора с параметрами приведенными в табл. 1 при объемном расходе  $Q = 0,03 \text{ м}^3/\text{с}$  и значениях  $T_{г0}$  280, 290 и 300 К.

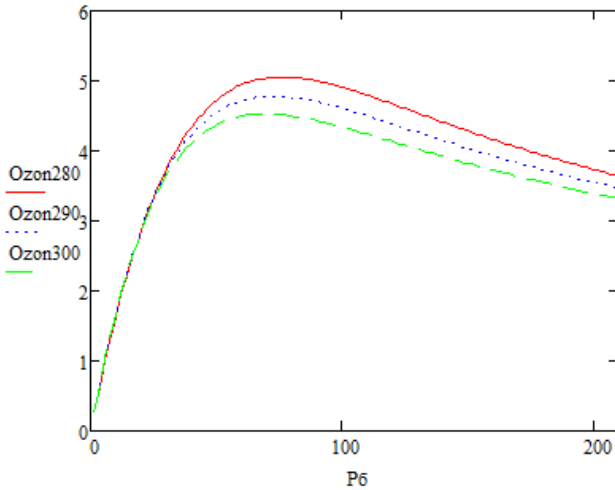


Рис. 4. Зависимости концентрации озона (%) в газовой смеси в момент ее выхода из озонатора от мощности барьерного разряда  $P_b$  (Вт)

Как видно из данного рисунка, при снижении исходной температуры газовой смеси максимум кривой смещается вправо, а значение максимума увеличивается.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА РЕЗУЛЬТАТОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 5 показана программа, составленная в среде Mathcad и реализующая итерационный процесс, основанный на уравнениях (1)-(13), который позволяет определить изменения во времени ряда взаимозависимых параметров озонатора (мощность барьерного разряда, температура, концентрация озона). На рис. 6 приведен график зависимости от времени для концентрации озона, полученный на основе результатов работы указанной программы при параметрах озонатора, приведенных в табл. 1. Как показывают расчеты, концентрация озона сначала растет, достигает пикового значения и затем испытывает некоторое снижение вследствие нагрева озонатора.

Для проверки результатов данного численного моделирования были проведены натурные экспериментальные исследования с озонатором сотовой структуры, имеющим те же параметры.

Сравнение расчетных и экспериментально измеренных значений концентрации озона после прохождения указанного пикового значения показано на рис. 7 (концентрация озона приведена в процентах от пикового значения).

```

ozon :=
T0 ← 300
O3_0 ← 0
O2_0 ← 1
uv ← U0 · Cb / (Cb + Cv)
for i ∈ 1..2000
    Ai ← (π · RO2^2 · O2_{i-1} + π · RO3^2 · O3_{i-1}) / (k · T_{i-1})
    Bi ← Ai · (EO2 · O2_{i-1} + EO3 · O3_{i-1})
    up_i ← (Bi · p · d) / ln(Ai · p · d / ln(1 + 1/γ))
    ug_i ← up_i · Cb / (Cb + Cv)
    Pi ← 2 · f · uv · N^2 · Cv · [(up_i)^2 - (ug_i)^2] / (up_i - ug_i)
    dTi ← (Pi - α · S · (T_{i-1} - T0)) / (m · C)
    Ti ← T_{i-1} + dTi
    K1_i ← A1 · e^(-E1 / (R · Ti)) · K0 · (Pi / V)
    K2_i ← A2 · e^(-E2 / (R · Ti)) · K0 · (Pi / V)
    dO3_i ← K1_i · (O2_0 - O3_{i-1}) - K2_i · O3_{i-1}
    O3_i ← O3_{i-1} + dO3_i
    O2_i ← O2_0 - O3_i
    
```

Рис. 5. Моделирование в среде MathCad параметров переходного процесса после включения озонатора с учетом (1)-(13)

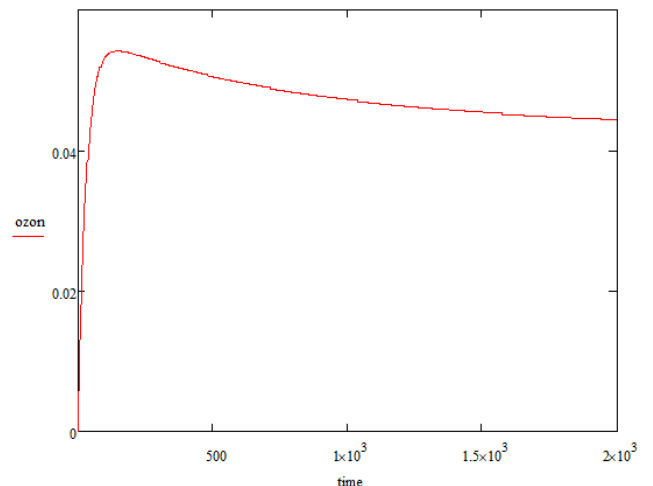


Рис. 6. Зависимость концентрации озона от времени (результат работы программы на рис. 5)

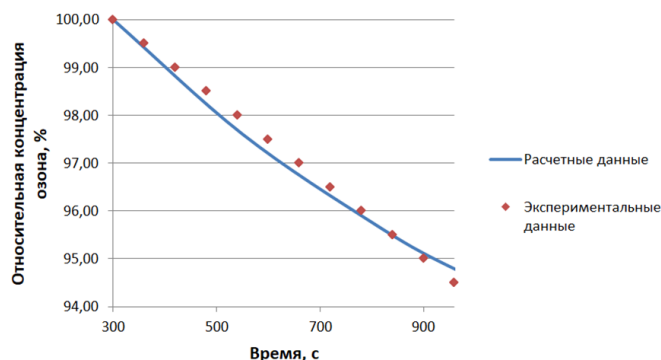


Рис. 7. Сравнение экспериментальных данных (пунктирная кривая) и результатов вычисления (сплошная кривая) концентрации озона относительно пикового значения

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описана конструкция озонатора сотовой структуры, разработанного на кафедре электромеханики УУНиТ. Разработана математическая модель физических процессов, протекающих в данном озонаторе. Исследовано взаимное влияние различных параметров (мощность барьерного разряда, температура, скорость движения и состав газовой смеси), как друг на друга, так и на эффективность образования озона.

На базе данной математической модели разработаны программные алгоритмы в среде Mathcad для проведения численных экспериментов.

В результате данных численных экспериментов исследована зависимость концентрации озона от мощности барьерного разряда при различных значениях температуры входящей газовой смеси.

Установлено, что имеется оптимальное значение мощности барьерного разряда, определяемое конструктивными параметрами озонатора, при котором достигается максимума концентрация озона в газовой смеси при ее выходе из озонатора, причем, в случае если газовая смесь предварительно охлаждена, данный максимум имеет более высокое значение.

Также в результате численных экспериментов проведено исследование зависимости концентрации озона от времени. Установлено, что после прохождения пикового значения в первые минуты работы озонатора данная концентрация испытывает некое снижение. Для верификации указанного теоретического вывода были проведены натурные экспериментальные исследования.

Разработанная математическая модель может быть использована для оптимизации конструкции озонатора по критерию максимизации выхода озона и минимизации удельных затрат энергии при его получении.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Calabrese E.J. Human and ecological risk assessment // IOA Ozone. – 1997. – Vol. 3/6. – P. 1-95.
2. PHI-004 – Effectiveness of ozone generated by dielectric barrier discharge plasma reactor against multidrug-resistant bacteria and Clostridium difficile spore // International Journal of Antimicrobial Agents. – 2021. – Vol. 58, supp. 1. – P. 2100412.
3. Niveditha A. Application of cold plasma and ozone technology for decontamination of Escherichia coli in foods – a review / A. Niveditha, R. Pandiselvam, V. Arun Prasath, Sushil

Kumar Singh, Khalid Gul, Anjineyulu Kothakota // Food Control. – 2021. – Vol. 130. – P. 108338.

4. Manjunath S.N. Recent case studies on the use of ozone to combat coronavirus: Problems and perspectives / Soumya Nagashri Manjunath, M. Sakar, Manmohan Katapadi, R. Geetha Balakrishna // Environmental Technology & Innovation. – 2021. – Vol. 21. – P. 101313.

5. Choi J.H. Analysis of sterilization effect by pulsed dielectric barrier discharge / Jai Hyuk Choi, Inho Han, Hong Koo Baik, Mi Hee Lee, Dong-Wook Han, Jong-Chul Park, In-Seob Lee, Kie Moon Song, Yong Sik Lim // Journal of Electrostatics. – 2006. – Vol. 64, iss.1. – P. 17-22.

6. Mouele E.S.M. A critical review on ozone and co-species, generation and reaction mechanisms in plasma induced by dielectric barrier discharge technologies for wastewater remediation / Emile Salomon Massima Mouele et al. // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2021. – Vol.9, iss.5.

7. Jodzis S. Energy efficiency of an ozone generation process in oxygen. Analysis of a pulsed DBD system / Sławomir Jodzis, Marcel Zięba // Vacuum. – 2018. Vol.155. – P. 29-37.

8. Jodzis S. Macrokinetic study on ozone boundary concentration. Effect of temperature / Sławomir Jodzis, Wojciech Patkowski // Journal of Electrostatics. – 2017. – Vol. 85. – P. 43-51.

9. Yuan D. Characteristics of temperature distribution in atmospheric pulsed surface dielectric barrier discharge for ozone production / Dingkun Yuan, Guangxue Zhang, Zhongqian Ling, Angjian Wu, Yong He, Zhihua Wang // Vacuum. – 2020. – Vol. 176.

10. Boonduang S. Effect of Oxygen Pressure and Flow Rate on Electrical Characteristic and Ozone Concentration of a Cylinder-Cylinder DBD Ozone Generator / S. Boonduang, S. Limsuwan, W. Kongsri, P. Limsuwan // Procedia Engineering. – 2012. – Vol.32. – P. 936-942.

11. Jodzis S. The influence of gas temperature on ozone generation and decomposition in ozone generator. How is ozone decomposed? / Sławomir Jodzis, Klaudia Baran // Vacuum. – 2021.

12. Park S.-L. Effective ozone generation utilizing a meshed-plate electrode in a dielectric-barrier discharge type ozone generator / Seung-Lok Park, Jae-Duk Moon, Seug-Hoon Lee, Soo-Yeon Shin // Journal of Electrostatics. – 2006. – Vol.64, iss.5. – P. 275-282.

13. Jodpimai S. Dielectric barrier discharge ozone generator using aluminum granules electrodes / S. Jodpimai, S. Boonduang, P. Limsuwan // Journal of Electrostatics. – 2015. – Vol.74. – P. 108-114.

14. Fang Z. Experimental study on discharge characteristics and ozone generation of dielectric barrier discharge in a cylinder-cylinder reactor and a wire-cylinder reactor / Zhi Fang, Yuchang Qiu, Yanzhou Sun, Hui Wang, Kuffel Edmund // Journal of Electrostatics. – 2008. – Vol.66, iss. 7-8. – P. 421-426.

15. Hafeez A. Optimization on cleaner intensification of ozone production using Artificial Neural Network and Response Surface Methodology: Parametric and comparative study / Ainy Hafeez, Syed Ali Ammar Taqvi, Tahir Fazal, Fahed Javed, Zakir Khan, Umme Salma Amjad, Awais Bokhari, Nasir Shehzad, Naim Rashid, Saifur Rehman, Fahad Rehman // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol.252.

# Multifactor Mathematical Model of Ozonator with Cell Structure

Ismagilov F.R., Maksudov D.V.

Ufa University of Science and Technology

Ufa, Russian Federation

[ifr@ugatu.ac.ru](mailto:ifr@ugatu.ac.ru), [maksudov.dv@ugatu.su](mailto:maksudov.dv@ugatu.su)

**Abstract.** The design of an ozonator with a honeycomb structure is presented. Mathematical modeling of this ozonator design was carried out, on the basis of which numerical experiments were performed. The dependence of ozone concentration at the output of the ozonator on various parameters was studied. To verify these results, full-scale experimental studies were carried out.

**Keywords:** ozonator, gas-discharge processes, numerical methods, experimental studies.

---

## Библиографическое описание статьи

Исмагилов Ф.Р. Многофакторная математическая модель озонатора сотовой структуры / Ф.Р. Исмагилов, Д.В. Максудов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2024. – Т.11, №4. – С. 34-40. DOI: 10.24892/RIJE/20240406

## Reference to article

Ismagilov F.R., Maksudov D.V. Multifactor mathematical model of ozonator with cell structure, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2024, vol.11, no.4, pp. 34-40. DOI: 10.24892/RIJE/20240406

---