

*KORNEEV Konstantin Borisovich* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: energy-tver@mail.ru

#### CITATION FOR AN ARTICLE

Dyundin A.S., Korneev K.B. Analysis of the effect of the automation of voltage reduction limitation on the maintenance of the electric power mode of operation of the power system of a large Russian city // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 1 (21), pp. 32–38.

УДК 537.523

### ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ ОЗОНАТОРА

*Д.В. Максудов*

*Уфимский университет науки и технологий (г. Уфа)*

© Максудов Д.В., 2024

**Аннотация.** Разработана математическая модель физических процессов, протекающих в озонаторе, а также представлены результаты численных расчетов, выполненных при реализации указанной модели при помощи программного пакета Scilab. Для верификации результатов численных экспериментов проведены натурные экспериментальные исследования зависимости концентрации озона от времени.

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

**DOI:** 10.46573/2658-7459-2024-1-38-45

#### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время отмечается значительный интерес исследователей к вопросам получения и применения озона. Высокая окислительная способность данной модификации кислорода делает привлекательной ее использование в различных областях человеческой деятельности, в том числе в нефтегазовой, химической и пищевой промышленности, в санитарии и медицине, а также для очистки воды, воздуха и выхлопных газов.

Как показывают экспериментальные исследования, эффективность образования озона зависит от различных факторов: амплитуды питающего напряжения [1]; плотности мощности барьерного разряда [2, 3]; температуры, давления, состава газа и скорости его потока [2–5]; формы электродов и диэлектрического барьера [7, 8]. При этом многие из этих параметров являются взаимозависимыми, что усложняет моделирование.

Таким образом, существенную проблему представляет необходимость разработки модели физических процессов в озонаторе, учитывающей большое количество взаимозависимых параметров, таких как температура, концентрация озона, мощность барьерного разряда и ряд других, что необходимо для решения задачи оптимизации

конструкции озонатора и характеристик его питания по критерию минимизации удельных затрат энергии при производстве озона. Отсутствие в настоящее время такой многофакторной модели отмечается, в частности, британскими исследователями [9], которые пытались применить нейронные сети для решения задачи оптимизации процесса образования озона.

В данной статье представлены результаты математического моделирования и экспериментальных исследований для озонатора, разработанного на кафедре электромеханики УУНиТ. Данный озонатор включает диэлектрический блок сотовой структуры, в каналы которого в шахматном порядке вложены две группы электродов. Разность потенциала между последними приводит к возникновению барьерного разряда, а стенки каналов при этом выступают в роли диэлектрических барьеров.

### 1. Математическое моделирование зависимости температуры озонатора и концентрации озона от времени

Внутри озонатора во время его работы происходят многочисленные антагонистические реакции образования и разложения озона. Основными из них являются следующие:



где M – некая молекула газа, и



В дальнейшем будут учитываться только реакции (R1) и (R2), влияние остальных реакций образования и разложения озона считается пренебрежимо малым.

С учетом реакций (R1) и (R2) кинетическое уравнение образования озона имеет вид [6]:

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

где  $[O_3]$  – концентрация озона;  $[O_2]$  – концентрация молекулярного кислорода;  $[O]$  – концентрация атомарного кислорода;  $K_1$  и  $K_2$  – константы скорости для реакций (R1) и (R2).

Атомарный кислород образуется в результате реакции распада молекул кислорода при их столкновении с электронами:



которая протекает в канале барьерного разряда наряду с реакцией ионизации молекул кислорода и размножения электронов в лавине



Из реакции (R3) следует, что концентрация атомарного кислорода пропорциональна концентрации свободных электронов и, следовательно, удельной мощности барьерного разряда.

При этом нужно также учесть, что константы  $K_1$ ,  $K_2$  зависят от температуры, которая меняется со временем и может быть определена из условия баланса тепловой мощности, выделяемой в процессе барьерного разряда, и потерь тепла, уходящего через боковые стенки озонатора или уносимого вместе с газовой смесью, проходящей через озонатор.

Таким образом, для определения концентрации озона необходимо решить систему дифференциальных уравнений, учитывающую удельную мощность барьерного разряда, зависимость от времени концентрации кислорода и температуры озонатора, а также другие параметры:

$$\begin{cases} \frac{d[O_3]}{dt} = K_1'([O_2]_0 - [O_3]) - K_1'[O_3]; \\ \frac{dT}{dt} = \frac{P - \Delta T \alpha S}{mC}, \end{cases} \quad (2)$$

где

$$K_1' = A_1 \exp\left(\frac{-E_{1a}}{RT}\right) K_0 \frac{P}{V};$$

$$K_2' = A_2 \exp\left(\frac{-E_{2a}}{RT}\right) K_0 \frac{P}{V};$$

$[O_3]$  – концентрация озона;  $t$  – время, с;  $[O_2]_0$  – начальная концентрация кислорода;  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль  $\times$  К);  $E_{1a}$ ,  $E_{2a}$ , – энергии активации реакций (R1) и (R2), Дж/моль;  $P$  – активная мощность барьерного разряда, Вт;  $A_1$ ,  $A_2$  – факторы частоты реакций (R1) и (R2), с<sup>-1</sup>;  $\Delta T = T - T_0$  – относительная температура, т.е. разность между температурой диэлектрического блока  $T$  (распределение температуры внутри диэлектрического блока принимается равномерным по его объему) и температурой окружающей среды  $T_0$ , К;  $V$  – суммарный объем каналов диэлектрического блока, м<sup>3</sup>;  $\alpha$  – коэффициент теплообмена между поверхностью диэлектрического блока и окружающим воздухом, Вт/(м<sup>2</sup>  $\times$  К);  $m$  – масса диэлектрического блока, кг;  $C$  – теплоемкость диэлектрика, Дж/(кг  $\times$  К).

Уравнения системы (2) выполняются при условии

$$\Delta T' \times \rho V C' = P t', \quad (3)$$

где  $\rho$ ,  $C'$  – плотность и удельная теплоемкость газа, проходящего через озонатор, выраженные в единицах системы СИ;  $t'$  – время прохождения газа через озонатор, с;  $\Delta T'$  – изменение температуры газа за время  $t'$ .

## 2. Результаты численных расчетов и экспериментальных исследований

Для решения системы дифференциальных уравнений (2) могут быть применены численные методы. На рис. 1 представлена структура имитационной модели в программном пакете Scilab для решения данной системы.

Блоки со значками  $\int$ ,  $\Sigma$ ,  $\Pi$  выполняют соответственно интегрирование, суммирование и умножение входящих в них величин; треугольные блоки выполняют умножение входящих величин на те параметры, которые написаны на этих блоках. В схеме также присутствуют два блока-осциллографа, выводящие графики зависимости от времени для температуры озонатора и концентрации озона. На рис. 2 и 3 показаны примеры данных графиков для случая образования озона в кислороде при следующих значениях параметров озонатора, входящих в систему (2):  $m = 3$ ;  $S = 0,05$ ;  $V = 0,0007$ ;  $P = 100$ ;  $C = 700$ ;  $\alpha = 50$ ;  $T_0 = 300$ .

При строгом решении задачи моделирования требуется также учесть, что мощность барьерного разряда  $P$  и коэффициент теплообмена  $\alpha$  зависят от температуры, а, следовательно, и от времени. Однако в данном примере для упрощения модели принято, что  $P = \text{const}$  и  $\alpha = \text{const}$ .

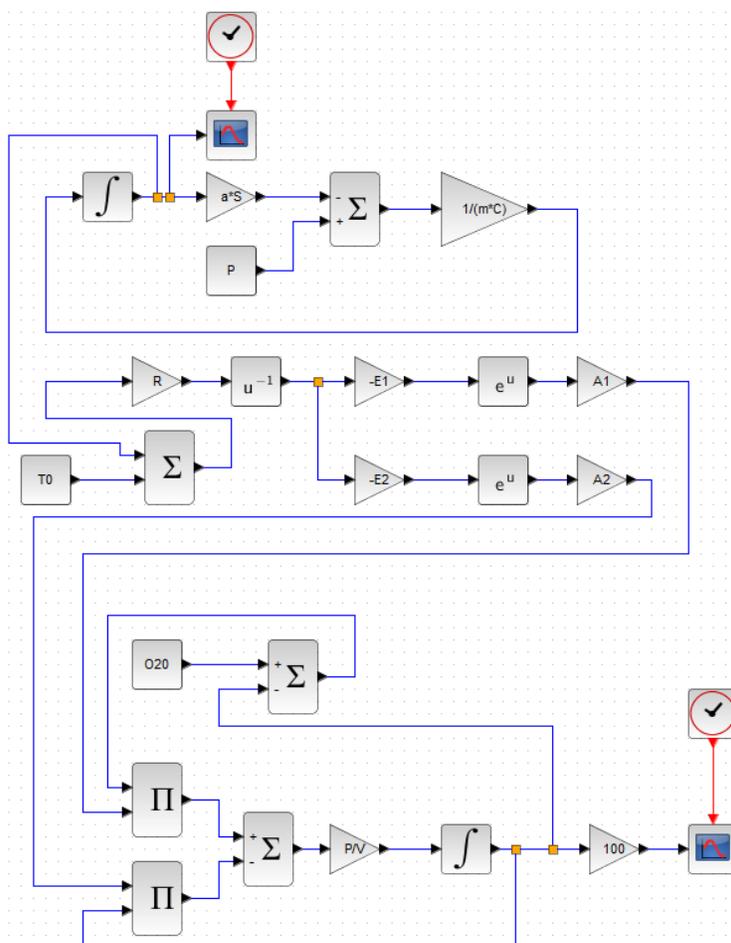


Рис. 1. Структура имитационной модели в программном пакете Scilab для решения системы дифференциальных уравнений (2)

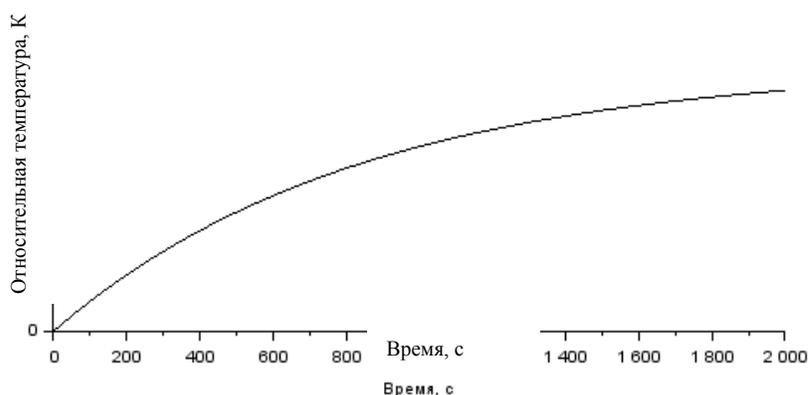


Рис. 2. Зависимость температуры озонатора от времени (показания верхнего осциллографа в схеме на рис. 1)

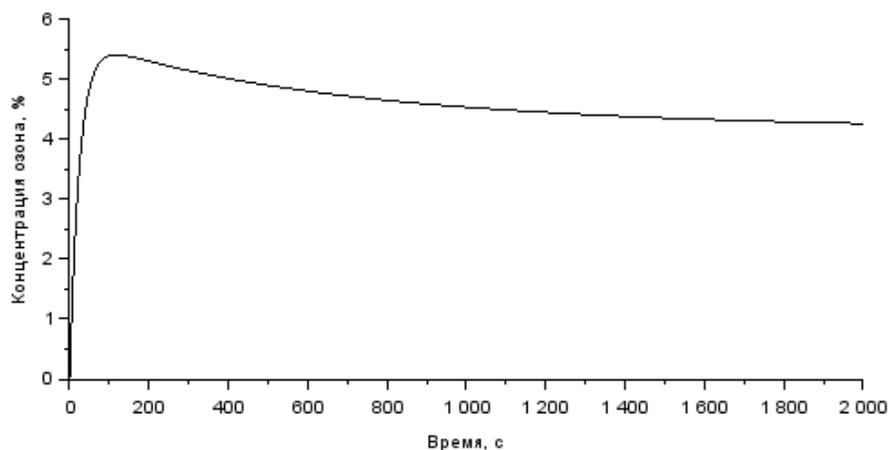


Рис. 3. Зависимость концентрации озона от времени (показания нижнего осциллографа в схеме на рис. 1)

Как видно из рис. 3, после включения озонатора концентрация озона сначала возрастает, затем начинает несколько снижаться (что обусловлено нагревом озонатора) и, наконец, стремится к стабильному значению.

В случае быстрого движения газовой смеси через озонатор, когда условие (3) не выполняется, снижение концентрации озона имеет менее выраженный характер.

Для верификации результатов численных экспериментов были проведены натурные экспериментальные исследования с использованием озонатора, параметры которого совпадают с параметрами для графиков 2 и 3. Сравнение расчетной и экспериментальной кривых для этого случая показано на рис. 4. Относительная величина отклонения между ними (в пределах времени проведения натурального эксперимента) не превышает 3,5 %.

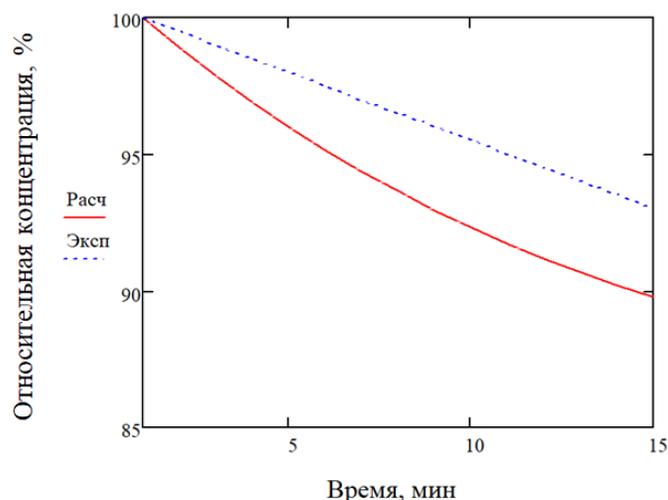


Рис. 4. Сравнение экспериментальных данных (пунктирная кривая) и результатов вычисления (сплошная кривая) концентрации озона относительно пикового значения при объемной скорости движения газовой смеси  $\theta = 40$  л/ч

### ВЫВОДЫ

Разработанная математическая модель протекающих в озонаторе физических процессов учитывает взаимозависимость некоторых параметров, влияющих на процесс образования озона. Представлены результаты численных расчетов, проведенных при реализации указанной модели при помощи программного пакета Scilab. Установлено, что после включения озонатора концентрация озона сначала возрастает, затем несколько снижается вследствие нагрева озонатора и, наконец, стремится к стабильному значению. Указанный характер зависимости концентрации озона от времени подтверждается результатами проведенных экспериментальных исследований. Следует отметить, что пиковое значение концентрации озона приходится на первые минуты работы озонатора.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fang Z., Qiu Y., Sun Y., Wang H., Edmund K. Experimental study on discharge characteristics and ozone generation of dielectric barrier discharge in a cylinder–cylinder reactor and a wire–cylinder reactor // *Journal of Electrostatics*. 2008. Vol. 66. Iss. 7–8, pp. 421–426.
2. Jodzis S., Zięba M. Energy efficiency of an ozone generation process in oxygen. Analysis of a pulsed DBD system // *Vacuum*. 2018. Vol. 155, pp. 29–37.
3. Jodzis S., Patkowski W. Macrokinetic study on ozone boundary concentration. Effect of temperature // *Journal of Electrostatics*. 2017. Vol. 85, pp. 43–51.
4. Yuan D., Zhang G., Ling Z., Wu A., He Y., Wang Z. Characteristics of temperature distribution in atmospheric pulsed surface dielectric barrier discharge for ozone production // *Vacuum*. 2020. Vol. 176, pp. 109351.
5. Boonduang S., Limsuwan S., Kongsri W., Limsuwan P. Effect of Oxygen Pressure and Flow Rate on Electrical Characteristic and Ozone Concentration of a Cylinder-Cylinder DBD Ozone Generator // *Procedia Engineering*. 2012. Vol. 32, pp. 936–942.

6. Jodzis S., Baran K. The influence of gas temperature on ozone generation and decomposition in ozone generator. How is ozone decomposed? // *Vacuum*. 2021. Vol.195, pp. 110647.
7. Park S.-L., Moon J.-D., Lee S.-H., Shin S.-Y. Effective ozone generation utilizing a meshed-plate electrode in a dielectric-barrier discharge type ozone generator // *Journal of Electrostatics*. 2006. Vol. 64. Iss. 5, pp. 275–282.
8. Jodpimai S., Boonduang S., Limsuwan P. Dielectric barrier discharge ozone generator using aluminum granules electrodes // *Journal of Electrostatics*. Vol. 74, 2015, pp. 108–114.
9. Hafeez A., Taqvi S.A.A., Fazal T., Javed F., Khan Z., Amjad U.S., Bokhari A., Shehzad N., Rashid N., Rehman S., Rehman F. Optimization on cleaner intensification of ozone production using Artificial Neural Network and Response Surface Methodology: Parametric and comparative study // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 252, pp. 119833.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

*МАКСУДОВ Денис Вилевич* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электромеханики, ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», 450076, Россия, г. Уфа, ул. Заки Валиди, д. 32. E-mail: maksudov.dv@ugatu.su

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Максудов Д.В. Применение численных методов для моделирования работы озонатора // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2021. № 1 (21). С. 38–45.

---

### APPLICATION OF NUMERICAL METHODS TO SIMULATE THE OPERATION OF AN OZONATOR

*D.V. Maksudov*

*Ufa State University of Science and Technology (Ufa)*

**Abstract.** A mathematical model of the physical processes occurring in the ozonizer has been developed, and the results of numerical calculations carried out when implementing this model using the Scilab software package are presented. To verify the results of numerical experiments, full-scale experimental studies of the dependence of ozone concentration on time were carried out.

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

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

*MAKSUDOV Denis Vilevich* – Associate Professor, Department of Electromechanics, Ufa University of Science and Technology, 32, Zaki Validi street, Ufa, 450076, Russia. E-mail: maksudov.dv@ugatu.su

**CITATION FOR AN ARTICLE**

Maksudov D.V. Application of numerical methods for modeling the operation of an ozonator // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 1 (21), pp. 38–45.

УДК 537.21

**ПОЛНЫЙ УЧЕТ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ЗАРЯЖЕННЫХ СФЕР**

*И.П. Попов*

*Курганский государственный университет (г. Курган)*

© Попов И.П., 2024

**Аннотация.** Рассмотрено электростатическое поле, созданное системой двух одноименных или разноименных зарядов. Расчеты выполнены для зарядов, расположенных на сферических непроводящих поверхностях, при этом полученные результаты могут обобщаться на любые формы заряженных объектов. Цель исследования – повышение корректности электростатических расчетов, исключающей возможность получения недостоверных результатов в виде бесконечно большой энергии. Применены методы электростатики. Энергия поля определена двумя способами: через плотность энергии и интегрирование по объему, занимаемому полем, и путем вычисления работы при гипотетическом перемещении заряженных объектов. Даны три определения различных видов электростатической энергии. Получены формулы для соответствующих энергий при различных комбинациях зарядов.

**Ключевые слова:** полная, условная реализуемая, нереализуемая, запасаемая энергия; одноименные, разноименные заряды.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2024-1-45-56**

**ВВЕДЕНИЕ**

Потенциальная электростатическая энергия электрических зарядов определяется по формуле [1–3]:

$$U = \pm \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r}.$$

При  $r \rightarrow 0$  энергия стремится к бесконечности, что неприемлемо. Рассуждения о невозможности достижения  $r = 0$  в связи с конечными размерами заряженных объектов непродуктивны, поскольку считается, что, например, электроны и позитроны не имеют размера.

**Цель исследования** – повышение корректности электростатических расчетов, исключающей возможность получения недостоверных результатов в виде бесконечно большой энергии.