

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 537.523

ОПТИМИЗАЦИЯ ЧАСТОТЫ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ ОЗОНАТОРА*Д.В. Максудов**Уфимский университет науки и технологий (г. Уфа)*

© Максудов Д.В., 2024

Аннотация. Представлена конструкция озонатора сотовой структуры. Разработан итерационный алгоритм, в результате работы которого для данного озонатора были получены графики зависимости критической частоты от амплитуды питающего напряжения, а также от температуры, состава и давления газовой смеси.

Ключевые слова: озонатор, сотовая структура, газоразрядные процессы, критическая частота, итерационный алгоритм.

DOI: 10.46573/2658-7459-2024-2-42-50**ВВЕДЕНИЕ**

Частота изменения внешнего напряжения является одним из факторов, влияющих на образование озона в барьерном разряде и эффективность данного химического элемента. Изучению указанного влияния посвящены многие научные исследования [1–13].

Рост частоты в пределах 10^6 Гц приводит к увеличению производительности озонатора, поскольку мощность барьерного разряда пропорциональна частоте (при этом, однако, должно выполняться качественное отведение образующегося тепла, поскольку повышение температуры приводит к быстрой диссоциации молекул озона). Как показали экспериментальные исследования [6], при превышении частотой некоего критического значения (около 10^6 Гц) производительность озонатора резко падает, а удельные затраты энергии для получения озона существенно возрастают. Причиной описанного явления служит относительно низкая подвижность ионов (в сравнении с электронами), вследствие чего при достаточно высокой частоте ионы не успевают пересечь разрядный промежуток и осесть на электродах за время полупериода изменения внешнего напряжения. Это, в свою очередь, стабилизирует положение каналов микрозарядов в пространстве и снижает эффективность образования озона из-за локализации барьерного разряда в небольшой части объема газовой смеси.

Таким образом, актуальной задачей является определение критической частоты, что представляет интерес с точки зрения оптимизации частоты питающего напряжения озонатора по критерию минимизации удельных затрат энергии при синтезе озона.

КОНСТРУКЦИЯ ОЗОНАТОРА СОТОВОЙ СТРУКТУРЫ

На рис. 1 представлена конструкция озонатора сотовой структуры, для которого проводилось математическое моделирование с целью определения критической частоты. Данная конструкция была разработана на кафедре электромеханики Уфимского университета науки и технологий.

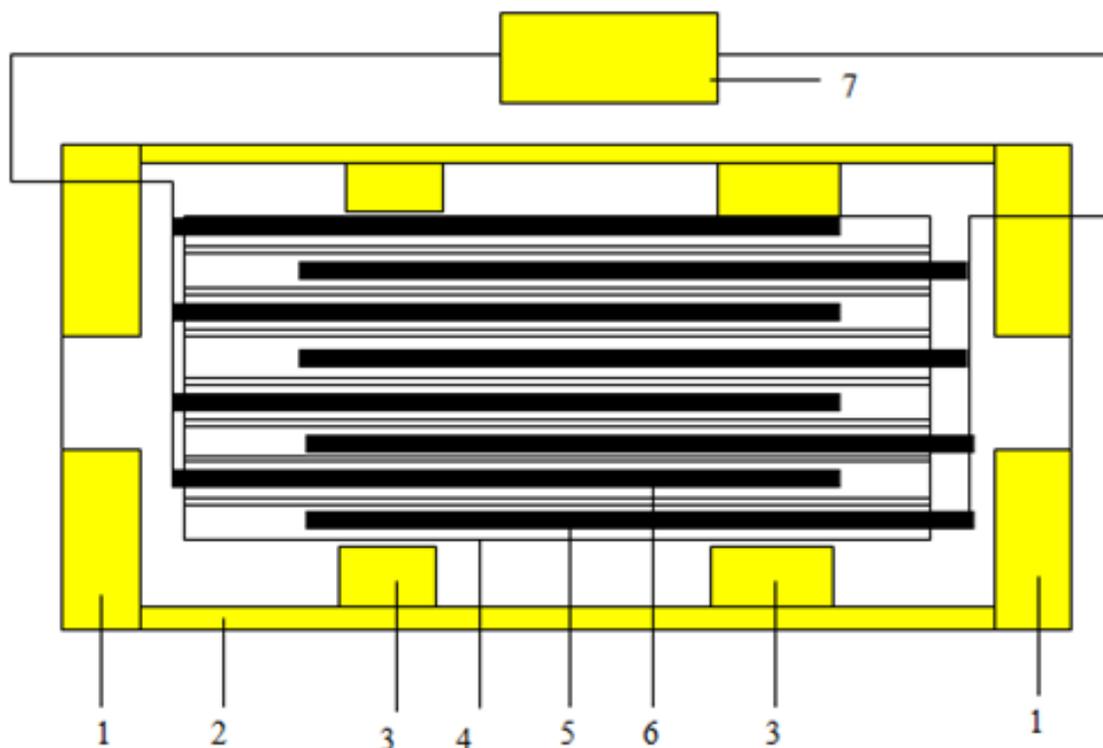


Рис. 1. Озонатор сотовой структуры в продольном разрезе:
1 – фланцы; 2 – диэлектрический корпус; 3 – изолирующие стойки;
4 – диэлектрик-катализатор сотовой структуры;
5, 6 – группы электродов разных потенциалов;
7 – высокочастотный источник переменного тока

Конструкция включает в себя диэлектрический блок сотовой структуры, в каналы которого в шахматном порядке вложены группы электродов, подключенные к источнику питания. Вследствие разности потенциала между этими электродами возникает барьерный разряд, причем в качестве барьера выступают стенки каналов диэлектрического блока. Ионы, образовавшиеся при вышеназванном разряде, двигаются в направлении катода, сталкиваясь при этом с молекулами газовой смеси, находящейся в разрядном промежутке.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ С ЦЕЛЬЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ

На длине свободного пробега λ ион приобретает энергию

$$E_{и} = \lambda e_{и} E = \frac{k T e_{и} E}{\sqrt{2} \pi d^2 p}, \quad (1)$$

где k – постоянная Больцмана, $k \approx 1,3 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; T – температура, К; $e_{и}$ – заряд иона, $e_{и} = e_{эл}$; E – напряженность электрического поля в прикатодной области; d – кинетический диаметр молекул, м; p – давление, Па.

Распределение напряженности электрического поля для сечения канала диэлектрического блока 4 (см. рис. 1) имеет неоднородный характер и может быть найдено с использованием метода зеркальных отображений:

$$E(x, z) = \frac{U_0}{2 \ln \left(\frac{R + \delta}{R} \right)} \left[\sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} \beta^{|i|+|j|} \frac{1}{\sqrt{(x - 2jh)^2 + (z - 2ih)^2}} \right],$$

где x и z – координаты на плоскости сечения рассматриваемого канала диэлектрического блока относительно оси электрода радиуса R , такие, что $x^2 + z^2 > R^2$; $|x| < h$; $|y| < h$;

$$\beta = \frac{\varepsilon_d - \varepsilon_b}{\varepsilon_d + \varepsilon_b} \quad (\varepsilon_b - \text{диэлектрическая проницаемость газовой смеси в разрядном (воздушном)}$$

промежутке; ε_d – проницаемость диэлектрического барьера); h – половина ширины канала, м; U_0 – напряжение питания, В; δ – ширина разрядного промежутка,

$$\delta = \frac{h' - d_d (\sqrt{N} + 1)}{2\sqrt{N}} - R,$$

где h' – ширина каталитического блока, м; d_d – толщина слоя диэлектрика (толщина стенок канала), м; N – число каналов в каталитическом блоке сотовой структуры; R – радиус электрода, м.

Поскольку в масштабах, соизмеримых с длиной свободного пробега, изменение напряженности электрического поля пренебрежимо мало, энергия, приобретаемая ионом на пути между столкновениями с молекулами, может быть определена при подстановке в формулу (1) значения напряженности в точке с координатами x , y , соответствующей началу этого пути:

$$E_n(x, z) = \frac{kTe_n E(x, z)}{\sqrt{2\pi d^2 p}} = \frac{kTe_n U_0}{\sqrt{8\pi d^2 p} \ln \left(\frac{R + \delta}{R} \right)} \left[\sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} \beta^{|i|+|j|} \frac{1}{\sqrt{(x - 2jh)^2 + (z - 2ih)^2}} \right].$$

Под действием электрического поля ион (атом кислорода) приобретает скорость, которая намного больше скорости теплового движения молекул V_T при нормальной температуре. Например, при параметрах озонатора, приведенных в таблице, и при движении из точки с координатами $(R + \delta, 0)$ на длине свободного пробега скорость иона

$$V_{и, \max} = \sqrt{\frac{2E_n(R + \delta, 0)}{m_{и}}} = 2 \cdot 10^4 \text{ м/с, где } m_{и} - \text{масса иона (при этом средняя скорость}$$

$$\text{движения } V_{и, \text{ср}} = \sqrt{\frac{E_n(R + \delta, 0)}{2m_{и}}} = 9,8 \cdot 10^3 \text{ м/с).}$$

Параметры озонатора

Параметр	Значение
Длина каталитического блока l , м	0,15
Высота / ширина каталитического блока h , м	0,07
Число каналов N	225
Толщина слоя диэлектрика D_d , м	10^{-3}
Напряжение источника питания U_0 , кВ	15

Поскольку скорость теплового движения $V_T \ll V_{и,макс}$, после столкновения иона (атома кислорода) с двухатомной молекулой кислорода, имеющей массу $m_{O_2} \approx 2m_и$, скорости иона $V'_и$ и молекулы V'_{O_2} определяются по формулам:

$$V'_и = \frac{2m_{O_2}V_T + V_{и,макс}(m_и - m_{O_2})}{m_и + m_{O_2}} \approx \frac{-m_иV_{и,макс}}{3m_и} = -\frac{1}{3}V_{и,макс}; \quad (2)$$

$$V'_{O_2} = \frac{2m_иV_{и,макс} + V_T(m_{O_2} - m_и)}{m_и + m_{O_2}} \approx \frac{2m_иV_{и,макс}}{3m_и} = \frac{2}{3}V_{и,макс}. \quad (3)$$

Использованные формулы (2) и (3) описывают изменение скоростей при столкновении иона с двухатомной молекулой кислорода. В случае если в канале микроразряда присутствуют также молекулы озона, то с учетом отношения $m_{O_3} \approx 3m_и$ и $V_{и,макс} \gg V_T$ конечная скорость иона после его столкновения с такими молекулами

$$V'_и = \frac{2m_{O_3}V_{и,макс} + V_{и,макс}(m_и - m_{O_3})}{m_и + m_{O_3}} \approx \frac{-2m_иV_{и,макс}}{4m_и} = -\frac{1}{2}V_{и,макс}; \quad (4)$$

скорость же молекулы озона

$$V'_{O_3} = \frac{2m_иV_{и,макс} + V_{и,макс}(m_{O_3} - m_и)}{m_и + m_{O_3}} \approx \frac{2m_иV_{и,макс}}{4m_и} = \frac{1}{2}V_{и,макс}. \quad (5)$$

Таким образом, при описанном соударении ион отскакивает от молекулы озона и движется в противоположном направлении со скоростью, примерно равной половине исходной.

С учетом выражений (2)–(5) для моделирования движения иона в разрядном промежутке может быть применен итерационный процесс. Например, при движении по траектории 1 (рис. 2) этот итерационный процесс имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 V_{и, \max}^{(0)} &= 0; \quad x^{(0)} = R + \delta; \\
 z^{(0)} &= 0; \quad t^{(0)} = 0; \\
 V_{и, \max}^{(i+1)} &= \frac{2}{m_{и}} \left[\frac{kTe_{и}U_0}{\sqrt{8\pi d^2 p} \ln\left(\frac{R+\delta}{R}\right)} \left[\sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} \beta^{|i+j|} \frac{1}{\sqrt{(x-2jh)^2 + (z-2ih)^2}} \right] - \frac{m_{и} \left(\frac{V_{и, \max}^{(i)}}{\operatorname{Re}(\xi(i))} \right)^2}{2} \right]; \\
 V_{и, \text{cp}}^{(i+1)} &= \frac{V_{и, \max}^{(i+1)} - \frac{1}{\operatorname{Re}(\xi(i))} V_{и, \max}^{(i)}}{2}; \\
 x^{(i+1)} &= x^{(i)} - \lambda = x^{(i)} - \frac{kT}{\sqrt{2\pi d^2 p}}; \\
 z^{(i+1)} &= z^{(i)}; \\
 t^{(i+1)} &= t^{(i)} + \frac{\lambda}{V_{и, \text{cp}}^{(i+1)}},
 \end{aligned} \tag{6}$$

где $\operatorname{Re}(\xi(i)) = \begin{cases} 2 & \text{если } \xi(i) = 0; \\ 3 & \text{если } \xi(i) > 0; \end{cases}$; $\xi(i)$ – случайная величина, принимающая на каждом

i -м шаге некое неотрицательное целое значение, равное нулю с вероятностью, равной мольной доле озона (в составе смеси, состоящей из двух- и трехатомных молекул кислорода); $t^{(i)}$ – время, прошедшее от момента начала движения иона до начала i -го итерационного шага; $V_{и, \text{cp}}^{(i)}$ – средняя скорость движения иона на i -м шаге; $V_{и, \max}^{(i)}$ – скорость движения иона к концу i -го шага; $x^{(i)}$, $z^{(i)}$ – координаты иона в начале i -го итерационного шага на плоскости сечения канала диэлектрического блока относительно точки пересечения данной плоскости с осью электрода, принятой за начало координат.

Итерационный процесс (6) продолжается, пока выполняется условие $x^{(i)} > R$, где R – радиус электрода.

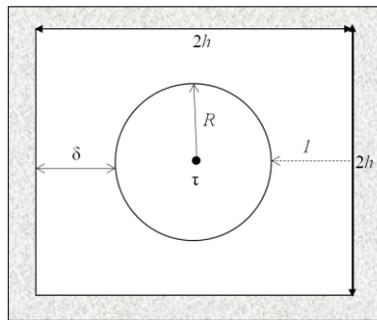


Рис. 2. Сечение канала диэлектрического блока

Итерационный процесс (6) был реализован средствами программирования в программном комплексе Mathcad. Результаты работы данного программного алгоритма для параметров озонатора, приведенных в таблице, даны на рис. 3–5.

На рис. 3а и 3б показаны зависимости скорости иона и величины пройденного им пути от времени его движения. На рис. 4а и 4б продемонстрирована зависимость критической частоты от величины питающего напряжения и давления газовой смеси.

Как видно из рис. 4а, с ростом напряжения происходит соответствующее увеличение критической частоты вследствие повышения напряженности электрического поля и скорости движения ионов.

С ростом давления сокращаются расстояние между молекулами газовой смеси и длина свободного пробега, а соответственно, снижается и скорость, которую ионы успевают набрать между столкновениями с молекулами. Следствием этого становится уменьшение критической частоты по мере роста давления газовой смеси, показанное на рис. 4б.

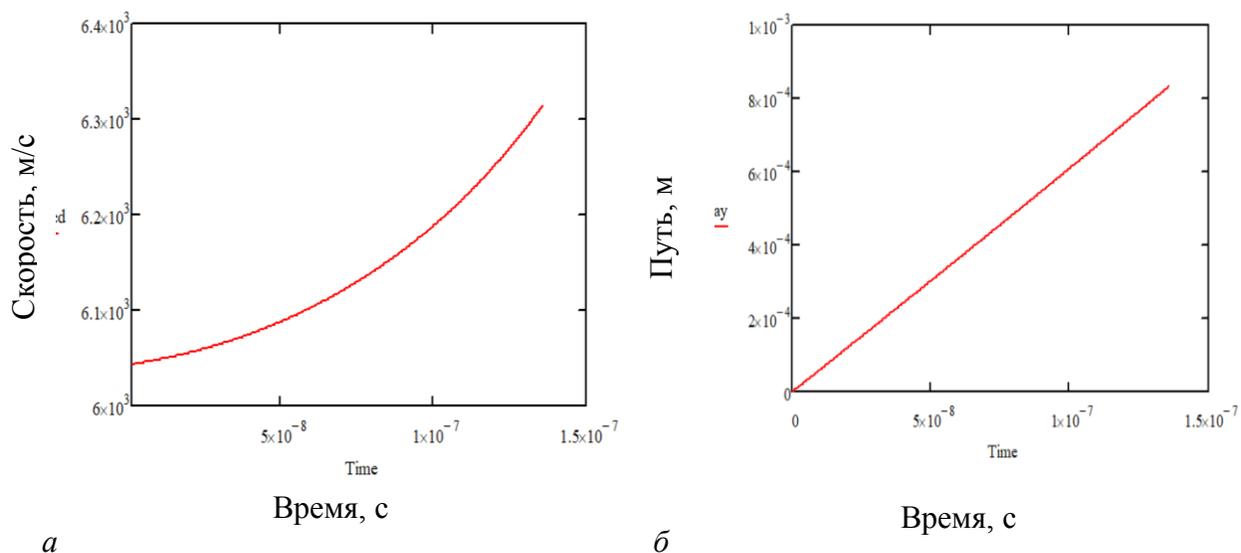


Рис. 3. График зависимости: а – скорости иона, м/с, от времени его движения, с; б – пути, пройденного ионом, м, от времени его движения, с

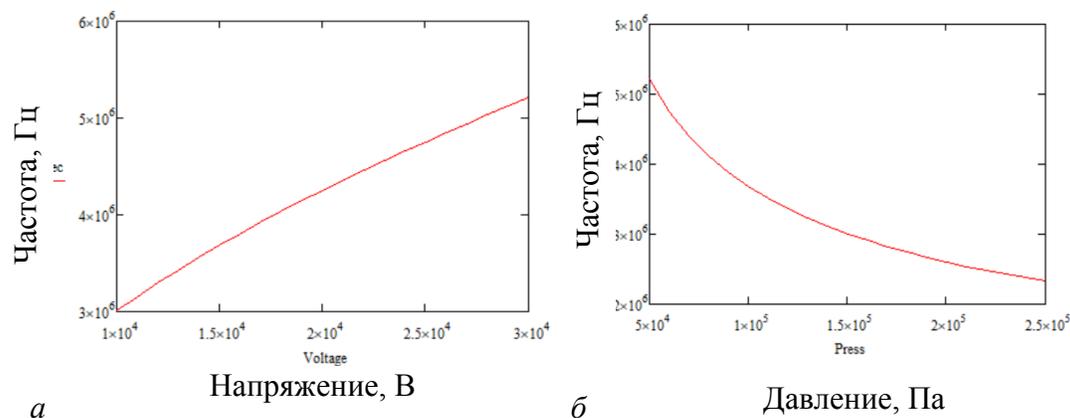


Рис. 4. График зависимости критической частоты, Гц: а – от питающего напряжения, В; б – давления газовой смеси в разрядном промежутке, Па

На рис. 5а приведена зависимость критической частоты от температуры газовой смеси. Диапазон температуры на графике выбран с учетом возможных ее значений в канале микроразряда.

С ростом температуры расстояние между молекулами газовой смеси и длина свободного пробега частиц также возрастают, что позволяет ионам набрать большую скорость на пути между соударениями. Следствием этого становится рост критической частоты, показанный на рис. 5а.

Результаты вычисления зависимости критической частоты от концентрации озона даны на рис. 5б.

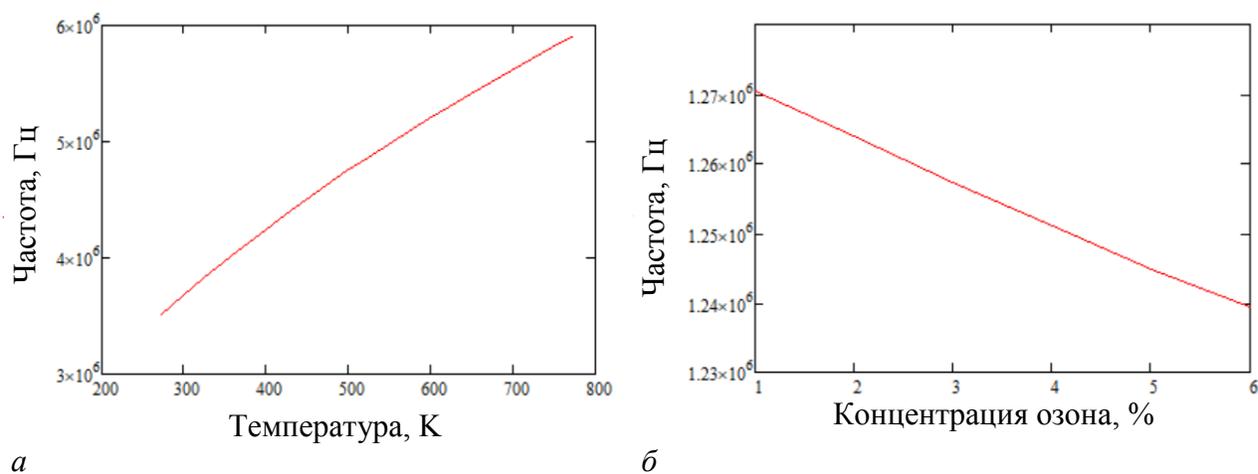


Рис. 5. График зависимости критической частоты, Гц:
а – от температуры газовой смеси в разрядном промежутке, К;
б – концентрации озона, %

Как видно из рис. 5б, с ростом концентрации озона снижается критическая частота. Это обусловлено тем, что инверсия скорости ионов при столкновении с молекулами озона больше, чем при столкновении с двухатомными молекулами кислорода, вследствие чего при увеличении концентрации озона происходит снижение средней скорости ионов и увеличение времени пересечения разрядного промежутка.

ВЫВОДЫ

Представлена конструкция озонатора сотовой структуры, разработанная на кафедре электромеханики Уфимского университета науки и технологий. В результате математического моделирования движения положительных ионов в разрядном промежутке данного озонатора разработан итерационный метод, позволяющий определить критическую частоту, при превышении которой ионы не успевают пересечь разрядный промежуток в течение полупериода приложенного напряжения, что приводит к снижению эффективности образования озона и росту удельных энергозатрат, необходимых для его синтеза.

Изучена зависимость критической частоты от различных факторов (амплитуды питающего напряжения, температуры и давления газовой смеси, концентрации озона в ней). Итоги данного исследования представляют интерес при решении задачи оптимизации режима работы озонатора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жуков А.А. Положительный объемный заряд и характер снижения в области первой критической частоты // *ЖТФ*. 1967. Т. 37. Вып. 4. С. 710.
2. Самойлович В.Г., Гибалов В.И., Козлов К.В. Физическая химия барьерного разряда. М.: Энергия, 1989. 174 с.
3. Fatechand R.R.T. The electrical breakdown of gaseous dielectrics of high frequencies. URL: <https://digital-library.theiet.org/doi/10.1049/pi-c.1957.0058> (дата обращения: 17.08.2024).
4. Kampshulte J., Luftdurchschlag und Überschlag von 50 und 100000 Hertz. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01657225> (дата обращения: 17.08.2024).
5. Lassen H. Frequenzabhängigkeit der Funkenspannung in Luft. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01657442> (дата обращения: 17.08.2024).
6. Aiba T., Freeman M.P. Mechanism of the Radiofrequency Ozonizer Discharge // *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*. 1974. Vol. 13. № 3, pp. 179–184.
7. Haverkamp R.G., Miller B.B., Free K. Ozone production in a high frequency dielectric barrier discharge generator. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Ozone-Production-in-a-High-Frequency-Dielectric-Haverkamp-Miller/8de9b506e14b71a7605cbced769c1d4162676e76> (дата обращения: 17.08.2024).
8. Zhehua Du, Xin Lin. Characteristic research on the generation of ozone using dielectric barrier discharge. URL: https://www.researchgate.net/publication/334694100_Characteristic_Research_on_the_Generation_of_Ozone_Using_Dielectric_Barrier_Discharge (дата обращения: 17.08.2024).
9. Guangming Huang. Dielectric barrier discharge for ozone generation. URL: <https://pureportal.strath.ac.uk/en/studentTheses/dielectric-barrier-discharges-for-ozone-generation-2> (дата обращения: 17.08.2024).
10. Kogelschatz U. Dielectric-barrier discharges: Their history, discharge physics, and industrial applications URL: https://www.researchgate.net/publication/225834883_Dielectric-Barrier_Discharges_Their_History_Discharge_Physics_and_Industrial_Applications (дата обращения: 17.08.2024).
11. Portugal S., Roy S., Lin J. Functional relationship between material property, applied frequency and ozone generation for surface dielectric barrier discharges in atmospheric air. URL: https://www.researchgate.net/publication/318682349_Functional_relationship_between_material_property_applied_frequency_and_ozone_generation_for_surface_dielectric_barrier_discharges_in_atmospheric_air (дата обращения: 17.08.2024).
12. Forte M.B.S., Jolibois J., Pons J., Moreau E., Touchard G., Gazalens M. Optimization of a dielectric barrier discharge actuator by stationary and non-stationary measurements of the induced flow velocity: application to airflow control. URL: https://www.researchgate.net/publication/226438066_Optimization_of_a_dielectric_barrier_discharge_actuator_by_stationary_and_non-stationary_measurements_of_the_induced_flow_velocity_Application_to_airflow_control (дата обращения: 17.08.2024).

13. Pons J., Moreau E., Touchard G. Asymmetric surface dielectric barrier discharge in air at atmospheric pressure: Electrical properties and induced airflow characteristics. URL: https://www.researchgate.net/publication/231039274_Asymmetric_surface_dielectric_barrier_discharge_in_air_at_atmospheric_pressure_Electrical_properties_and_induced_airflow_characteristics (дата обращения: 17.08.2024).

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. Оптимизация частоты питающего напряжения озонатора // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2024. № 2 (22). С. 42–50.

OPTIMIZATION OF OZONATOR SUPPLY VOLTAGE FREQUENCY

D.V. Maksudov

Ufa State University of Science and Technology (Ufa)

Abstract. An original design of an ozonizer with a honeycomb structure is presented. An iterative algorithm was developed, as a result of its operation for a given ozonizer, graphs of the dependence of the critical frequency on the amplitude of the supply voltage, as well as on the temperature, composition and pressure of the gas mixture were obtained.

Keywords: honeycomb structure ozonizer, gas-discharge processes, critical frequency, iterative algorithm.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

MAKSUDOV Denis Vilevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the 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. Optimization of ozonator supply voltage frequency // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 2 (22), pp. 42–50.