

УДК 621.31

**ОЗОНАТОР С ИМПУЛЬСНО - ПЕРИОДИЧЕСКИМ ПИТАНИЕМ****НИЗАМОВ Т.И.***Азербайджанское Национальное Аэрокосмическое Агентство*

В данной работе рассматривается принцип действия озонатора с импульсно-периодическим питанием. Величина параметров импульсов напряжения управляется оптимальным образом для получения максимальной активной мощности электрического разряда и максимально достижимого при этом коэффициента мощности.

Озон, в виду своей высокой активности, привлекает все более пристальное внимание в различных областях и, в первую очередь, в пищевой промышленности, в практике водоочистки, медицине и т.п. Однако, в силу низкой стойкости, озон необходимо получать в месте (точке) его использования и поэтому экономические показатели процесса получения озона приобретают первостепенное значение.

Анализ сложившейся ситуации позволяет сделать вывод, что существенное улучшение этих показателей может быть достигнуто оптимизацией конструктивных параметров озонатора и параметров режима синтеза озона.

Известно, что существенное влияние на показатели работы озонатора оказывает температура газа в разрядном промежутке. С ее повышением резко снижается эффективность синтеза и повышается скорость распада озона. Принимаемые в настоящее время меры по охлаждению разрядного промежутка мало эффективны из-за низкой теплопроводности системы газ-стенка, с другой стороны, интенсивное охлаждение (водяное) усложняет систему в целом. Задача отвода тепла усугубляется тем, что между электродами должно поддерживаться напряжение 10 кВ и более, поэтому между ними должна быть обеспечена надежная электрическая развязка.

Изучение кинетики синтеза озона показывает, что при разряде выделяется большая электрическая мощность, из которой только незначительная часть, менее 10 %, затрачивается на синтез озона. Остальная часть затраченной энергии преобразуется в тепло, повышая температуру в разрядном промежутке, разогревая поверхность электродов.

Анализ опубликованных работ по электросинтезу озона показывает, что хотя многие авторы, указывают на температурный режим как на один из наиболее важных факторов, на наш взгляд, этому вопросу уделялось мало внимания, например, в опубликованных материалах нет данных о распределении температуры в разрядном промежутке, ничего нет о повышении температуры за счет вязкого трения в потоке газа, об отводе тепла через стенки озонатора и т.п.

Рассматривая разрядный промежуток трубчатого озонатора длиной  $l$ , положим ширину равной  $2\pi R$  и толщину -  $h$ . В связи с тем, что обычно величина  $h$  много меньше  $R$ , с высокой степенью точности можно считать, что разрядный промежуток имеет вид плоского кольцевого зазора. Помимо этого, с достаточной точностью можно считать, что на скоростях меньше скорости звука газ несжимаем. Тогда уравнение переноса тепла может быть представлено в виде [1, 2]:

$$\rho Q \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \nabla T \right) = \operatorname{div}(\lambda \nabla T) + \frac{\eta}{2} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} \right)^2 + q, \quad (1)$$

где  $\rho$  - плотность газа;  $Q$  - теплоемкость газа при постоянном давлении;  $\vec{v}$  - вектор скорости потока газа;  $\eta$  - динамическая вязкость;  $q$  - объемная плотность тепловых источников;  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности;  $T$  - температура;  $x_i$  - координата ( $x, y, z$ ).

В уравнении (1) член  $\partial T/\partial t$  отражает нестационарность процесса переноса тепла. В стационарном процессе  $\partial T/\partial t=0$ . перенос тепла вдоль трубы определяется членом  $\vec{v}\nabla T$ . В бесконечно длинной трубе при однородной температуре стенок и однородных объемных источниках тепла лапласиан  $\nabla T$  становится равным нулю. В трубе конечных размеров при скорости потока  $v_z$  член  $\vec{v}\nabla T \rightarrow v_z \partial T/\partial Z$ .

Сток тепла за счет теплопроводности газа отражается членом  $div(\lambda\nabla T)$ . Так как коэффициент теплопроводности  $\lambda$  можно считать однородным, то  $div(\lambda\nabla T) \rightarrow \lambda\nabla T$ . В случае  $h \ll R$  (как нами принято изначально). Лапласиан  $\nabla T$  сводится к  $\partial^2 T/\partial x^2$ , где  $x$  - координата, направленная вдоль толщины разрядного промежутка, перпендикулярно поверхности электродов. Выделение тепла за счет внутреннего трения отражается членом  $\frac{\eta}{2} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} \right)^2$ . Строгое изучение влияния внутреннего трения на измерение тем-

пературы в потоке газа при скорости  $10^2$  м/с в случае двустороннего охлаждения повышает температуру на  $2,5$  °С, в случае одностороннего -  $20$  °С. Поэтому при выбранных скоростях потока газа влиянием вязкого трения на изменение температуры можно пренебречь.

Последний член уравнения (1), объемная плотность источников тепла, считая разряд однородным и пренебрегая затратами на синтез озона, находится из:

$$q = P/h2\pi Rl, \quad (2)$$

где  $P$  - активная мощность электрического разряда.

Рассматривая уравнение (1) для трубчатых озонаторов конечной длины, следует отметить, что в стационарном режиме некоторая часть энергии разряда выносится с потоком газа. Эта энергия может быть определена по выражению [1]:

$$P_- = Q\rho\mu\Delta T, \quad (3)$$

где  $\mu$  - расход газа через озонатор,  $\Delta T=T_2-T_1$  - разность температур на выходе и входе в озонатор соответственно.

Решение уравнения теплопроводности для одностороннего охлаждения позволяет получить:

$$\Delta T = \frac{Ph}{6\pi R\lambda}. \quad (4)$$

Отсюда, при  $h=2$  мм,  $R=8,5$  мм,  $l=320$  мм,  $\lambda=3,4\cdot 10^{-2}$  Вт/м<sup>2</sup>К, получаем  $P_- = 1,32\cdot 10^3 P\lambda$ , а при  $\mu=0,76\cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/с уносимая энергия сравнивается с выделяемой. Очевидно, что в реальных системах газ будет все-таки нагреваться, но при определении температурного режима необходимо учитывать выносимую энергию [1].

Так как конкретный размер разрядного промежутка много меньше продольного, то поперечное распределение температуры устанавливается за счет оттока тепла в стенки и профиль его в каждом сечении имеет вид:

$$T(z)f(x), \quad (5)$$

где  $f(x)=xh-x^2/2$  (одностороннее охлаждение). Уравнение теплопроводности для продольной координаты приобретает вид:

$$v \frac{d\bar{T}}{dt} = \frac{q}{Q\rho} - \beta\bar{T}, \quad (6)$$

где  $v$  - средняя величина скорости газа в разрядном промежутке;  $\bar{T}$  - средняя величина температуры по сечению разрядного промежутка;  $\beta$  - коэффициент объемного расширения.

Решение уравнения (6) после соответствующих преобразований может быть приведено к виду:

$$\bar{T}(z) = \bar{T}_1 + \frac{qh^2}{3\lambda} \left( 1 - e^{-\frac{3\lambda}{Q\rho h^2 v} z} \right). \quad (7)$$

Из выражения (7) находится длина разрядного промежутка  $l$ , при которой температура в нем не достигает критических величин:

$$l \ll \frac{Q\rho h^2 v}{3\lambda} = \frac{Q\rho h v}{6\pi R\lambda}. \quad (8)$$

При  $h=2$  мм, согласно (8),  $l \ll v/21$ . Следует отметить, что при  $(\beta h)^2 \ll 3$  необходимо учитывать отток тепла, вызванный градиентом температуры вдоль оси  $z$  ( $\lambda d^2(z)/dz^2$ ). В этом случае:

$$\bar{T}(z) = \bar{T} + \frac{ql}{Q\rho v} = \bar{T}_1 + \frac{P}{Q\rho\mu}. \quad (9)$$

Т.е. при малой величине  $l$  нагрев газа в разрядном промежутке определяется только отношением электрической мощности  $P$  к расходу газа.

Анализ полученных результатов позволил сделать вывод, что уменьшения тепловых нагрузок в разрядном промежутке можно достичь нестационарностью разряда. Для этого нужно подавать напряжение на озонатор в виде последовательности прямоугольных импульсов длительностью  $\tau$  и периодом повторения  $t_1$ , чтобы к последующему импульсу озонатор успел заполниться новой порцией газа, период следования этих импульсов должен быть  $t_1 = l/h$ , а длительность импульса  $\tau < t_1$ , обеспечивая малый нагрев газа за время действия импульса. Одновременно, импульсное питание озонатора позволяет регулировать количество озона в выходящем потоке путем изменения длительности импульса  $\tau$  при неизменных величинах напряжения и скорости прокачки газа. Последнее весьма существенно для эффективности работы озонатора, т.к. изменением напряжения и скорости потока возможно в очень узком диапазоне. Изменение температуры во времени в разрядном промежутке находится из уравнения (1) с учетом нестационарности процесса [1, 3]. Решение этого уравнения позволяет получить:

$$\delta = \frac{3\lambda}{\rho Q h^2 \left( 1 - e^{-\frac{\beta l}{h}} \right)} = \frac{\beta}{1 - e^{-\frac{\beta l}{h}}}, \quad (10)$$

а при  $\beta l/h \ll 1$  (короткие промежутки)

$$\delta = \nu/l. \quad (11)$$

Важное место в вопросе распределения температуры в разрядном промежутке занимает процесс передачи тепла охлаждающей системе.

При одностороннем охлаждении электрода водой изменение температуры может быть представлено диаграммой, изображенной на рис. 1.

Обозначим температуру стенки со стороны охлаждающей жидкости  $T_1$ , а со стороны разрядного промежутка  $T_3$ , тогда

$$\Delta T_{1,3} = \frac{G}{\alpha_{1,3} S}, \quad (12)$$

где  $G$  - количество тепла, выделяющегося в разрядном промежутке в единицу времени,  $\alpha_1(\alpha_3)$  - коэффициент теплоотдачи стенка-жидкость (газ);  $S$  - площадь поверхности, через которую идет передача тепла.

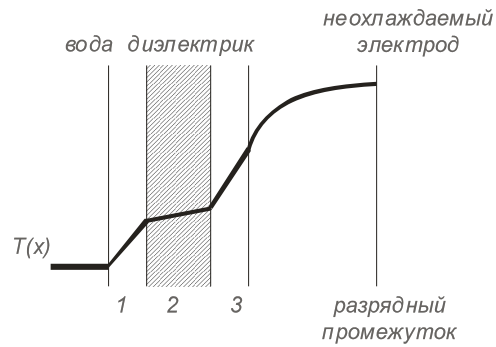


Рис. 1. Диаграмма изменения температуры в пространстве «разрядный промежуток - охлаждающая система». 1 - пристеночный слой жидкости; 2 - слой разделяющего материала; 3 - пристеночный слой газа

В различных литературных источниках приводятся отличные друг от друга формулы определения коэффициента теплопередачи  $\alpha$ . Расчеты по этим формулам дают существенно различающиеся результаты. Однако, в любом случае величина  $\alpha_3$  много меньше  $\alpha_1$ , т.е. перепад температур в пристеночном слое газа существенно больше, чем в пристеночном слое охлаждающей воды.

При двухстороннем охлаждении необходимо учитывать, что поток тепла из разрядного промежутка идет в обе стороны (симметричное охлаждение), поэтому в выражении (12) следует убрать половинное значение  $G$ .

Аналогично находится перепад температуры в слое диэлектрика.

Проведенный теоретический анализ подтвердил, что наиболее существенные приращения температуры происходят в самом разрядном промежутке и пристеночном слое газа из-за низкой теплопроводности и теплоотдачи газа.

Другим, не менее важным параметром процесса синтеза озона, являются кинетические коэффициенты:  $k_0$  - синтеза и  $k_1$  - распада, т.к. производительность и эффективность озонатора линейно зависят от величины  $k_0$ , в то время как величина  $k_1$  зависит от параметров разрядного промежутка, температуры воздушно-озоновой смеси в нем и т.п. На наш взгляд, кинетическим коэффициентом в опубликованных материалах уделяется незаслуженно мало внимания, а имеющиеся отрывочные сведения порой противоречивы даже в одном источнике.

При составлении кинетического уравнения синтеза озона для удобства время взаимодействия кислорода с разрядом заменено эквивалентной величиной равной отношению длины разрядного промежутка к скорости потока. Известно, что скорость потока является отношением расхода газа и к сечению разрядного промежутка. Учитывая пропорциональность кинетических коэффициентов объемной плотности мощности разряда, окончательно получим отношение  $P/\mu$ , которое в уравнении играет роль времени. Тогда [2, 3]:

$$\frac{dx}{d\frac{P}{\mu}} = k_0(c-x) - k_1c - (k_0 + k_1)x_1, \quad (13)$$

где  $x$  - концентрация озона в объемных процентах;  $c$  - концентрация кислорода в газовой смеси на входе в озонатор.

Решение этого уравнения имеет вид:

$$x = x_p \left( 1 - e^{-(k_0 + k_1)P/\mu} \right), \quad (14)$$

где  $x_p = \frac{ck_0}{k_0 + k_1}$  - равновесная концентрация озона, достигаемая при  $P/\mu \rightarrow \infty$ . Выражение (14) в виде графика представлено на рис. 2.

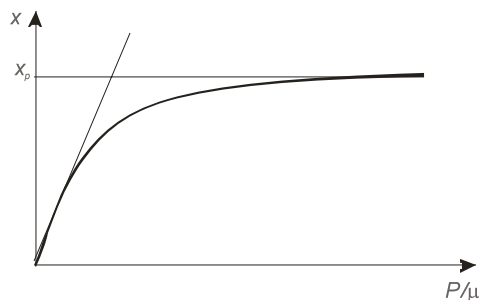


Рис. 2. Решение кинетического уравнения синтеза озона  $x(P/\mu)$

Кривая  $x(P/\mu)$  имеет два характерных участка: при  $P/\mu \rightarrow 0$  - крутизна этой кривой максимальна и при  $P/\mu \rightarrow \infty$  асимптотически приближается к постоянной величине, равной  $x_p$ .

Следует отметить, что если требуется обеспечить максимальную концентрацию озона в выходящей воздушно-озоновой смеси, то необходимо работать при максимальных значениях  $P/\mu$ , т.е. при заданной мощности разряда  $P$  - при минимальной величине расхода газа  $\mu$  через разрядный промежуток. Эффективность процесса обычно выражается отношением массы синтезированного озона к потребляемой мощности:

$$m = \frac{x}{100} \mu \rho. \quad (15)$$

Отсюда эффективность  $\psi$  равна:

$$\psi = \frac{m}{P} = \frac{10^{-2} \rho x \mu}{P}, \quad (16)$$

т.е. величина  $\psi$  стремится к нулю при равновесных концентрациях озона  $x_p$  ( $P/\mu \rightarrow \infty$ ) и максимальна при  $P/\mu \rightarrow 0$  или  $\mu \rightarrow \infty$ .

Анализ полученных результатов исследования приводит к выводу, что синтез озона лучше проводить на начальном участке кинетической кривой (рис. 2) при  $P/\mu \rightarrow 0$ . К тому же на этом участке температурные эффекты наименее выражены.

Приведенное выше позволило разработать методику расчета конструктивных размеров озонатора и определить оптимальные параметры режима работы как при постоянном (стационарном) напряжении питания, так и при импульсно периодической накачке.

#### Выводы

1. Изучение температурного режима разрядного промежутка позволило разработать, исследовать и предложить для широкого использования озонатор с импульсно-периодическим питанием, в котором создается возможность оптимизации температурного режима в разрядном промежутке.
2. Строгий анализ температурного режима и кинетических коэффициентов процесса синтеза озона позволил разработать методику расчета озонатора, как при стационарном режиме работы, так и при импульсно-периодическом питании, оптимизировать конструктивные размеры и параметры режима работы.

- 
1. Филиппов Ю.В., Вобликов В.А., Пантелеев В.И. Электросинтез озона. -М.: Издательство Московского Университета, 1987.
  2. Теплотехника. -М.:, Издательство Металлургия, 1973.
  3. Кухлинг Х. Справочник по физике. -М.: Мир, 1982.

## **OZON GENERATORUNUN PERİODİK İMPULSLA QİDALANDIRILMASI**

**NİZAMOV T.İ.**

Məqələdə ozon generatorunun periodik impuls ilə qidalandırılmasından bəhs olunur. Təyin olunub ki, impulsun müddəti və periodu təklif olunan kimi seçilsə ozon generatorunun konstruksiyası elə hesablanır ki, onun məhsuldarlığı daha effektiv olar. Odur ki, təklif olunan ifadə optimal konstruksiyanın seçilməsinə imkan verir.

## **OZONIZER WITH PULSE-PERIODIC SUPPLY**

**NİZAMOV.T.I.**

The principle of action of ozonizer with pulse-periodic supply is considered in given work. The value of voltage pulse is operated for getting the maximum active power of the electrical discharge and maximum of the power coefficient. The length of discharge interval has been chosen from the considered of lack of gas temperature saturation by the tube of the ozonizer. The discharge pulse period has been coordinated with the speed of the flow and with the length of discharge interval in such a way that the ozone synthesis start in low temperatures of gas in each cycle. Maximum duration of the discharge pulses has limited by requirement of the final rise of the temperature of gas (in the discharge interval).