

УДК 621.314.261

Ф. Р. ИСМАГИЛОВ, Д. В. МАКСУДОВ

## ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И ГЕОМЕТРИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОКРУЖЕНИЯ НА РАЗВИТИЕ БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА

Приводится математическое описание процессов развития барьерного разряда в электротехническом устройстве с неоднородным диэлектрическим наполнением с учетом геометрии данного наполнения и частоты электрического поля. Показано влияние указанных факторов на эффективность развития барьерного разряда и его коэффициент мощности. Приведены результаты лабораторных исследований. *Неоднородный диэлектрик; распределение электрических полей; барьерный разряд; активная мощность барьерного разряда*

Экспоненциально быстрый рост численности автопарка мегаполисов развитых стран привел в последние десятилетия к назреванию экологических проблем, которые актуализируют развитие технологий нейтрализации токсичных примесей выхлопных газов.

Применяемые в настоящее время платино-палладиевые катализаторы в сотовом исполнении (сотовые каталитические блоки) осуществляют эффективную нейтрализацию токсичных примесей при температуре выхлопных газов порядка нескольких сотен градусов.

Однако известно, что значительное количество вредных веществ выделяется в момент старта двигателя, когда температура выхлопных газов еще не достаточна для преодоления энергетического барьера каталитических реакций.

Эта проблема, получившая название «проблемы холодного старта», требует адекватного решения.

Одно из возможных решений, предлагаемое совместно лабораторией экологического катализа Института катализа СО РАН (Новосибирск) и кафедрой электромеханики Уфимского государственного авиационного технического университета (Уфа), заключается в возможности повысить энергетику реакции за счет параллельного применения озона, генерируемого по всему объему сотового каталитического блока [1, 2].

Подобный подход к решению проблемы «холодного старта» в свою очередь актуализирует ряд исследований, проводимых авторами, в частности, поиск оптимальной частоты барьерного разряда, при которой имеет ме-

сто наиболее эффективная и энергоэкономичная генерация озона в присутствии некоторых каталитических веществ.

Возможности для поиска оптимальной частоты и оптимальной геометрии диэлектрического наполнения электротехнических устройств, в которых имеет место барьерный разряд, предоставляет разработанная авторами математическая модель распределения электрических полей в сложной геометрии диэлектрике и, в частности, в сотовых каталитических блоках.

### 1. ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПРОЦЕСС РАЗВИТИЯ БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА

Результаты, полученные в ходе математического моделирования и проведенных экспериментов, показывают, что данная частотная характеристика далека от прямолинейной формы и имеет как пиковые области, соответствующие оптимальным частотам, так и интервалы частот, в которых генерация озона практически прекращается. Последние были названы авторами «мертвыми зонами». Причина их возникновения имеет следующее физическое обоснование: рост частоты может достигнуть предела, при котором полупериод приложенного напряжения оказывается короче времени запаздывания старта ионизационных процессов в газоразрядном промежутке, для инициации которых необходим начальный, случайно возникающий заряд, а также то, что, с другой стороны, при достаточно высокой (первой критической) частоте ионы не успевают в течение полупериода пере-

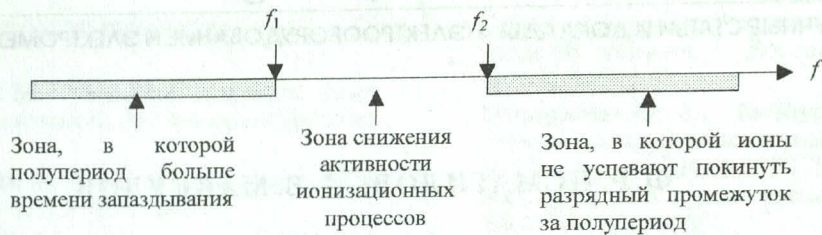


Рис. 1. Частотный диапазон

сечь разрядный промежуток и способны оказывать влияние на ионизационные процессы в следующем полупериоде.

Исходя из вышесказанного можно предположить существование «мертвой зоны» частотного диапазона (рис. 1), в которой полупериод уже слишком краток, чтобы за это время мог случайно появиться первичный ионизационный электрон, но в то же время еще слишком долгод для того, чтобы заряды из предыдущего полупериода, не успев пересечь разрядный промежуток и нейтрализоваться на электроде противоположной полярности, могли принять участие в старте ионизационных процессов в данном полупериоде, т. е. чтобы выполнялось неравенство

$$f_1 < f_2,$$

где  $f_1$  — частота, при которой полупериод становится сравним со статистическим временем запаздывания начала ионизационных процессов,  $f_2$  — частота, при которой заряды не успевают покинуть газоразрядный промежуток в течение полупериода и могут оказывать влияние на ионизационные процессы в следующем полупериоде или же

$$\frac{1}{T_3} < \frac{\mu E}{d},$$

где  $T_3$  — время запаздывания, с;  $\mu$  — подвижность ионов, см<sup>2</sup>/В·с;  $E$  — напряженность электрического поля, В/м;  $d$  — ширина разрядного промежутка, м.

Будет ли выполняться данное неравенство, т. е., возникнет ли «мертвая зона» в частотном диапазоне, зависит от конкретной конструкции озонатора и геометрии его диэлектрического наполнения и может быть однозначно определено посредством разработанного математического моделирования.

Суть данного моделирования заключается в поиске распределения электрического поля в пространстве, заполненном диэлектрическими структурами различной геометрии, и

влиянии указанного распределения на развитие барьерного разряда.

Результаты математического моделирования нашли подтверждение в ходе проведенных авторами лабораторных исследований.

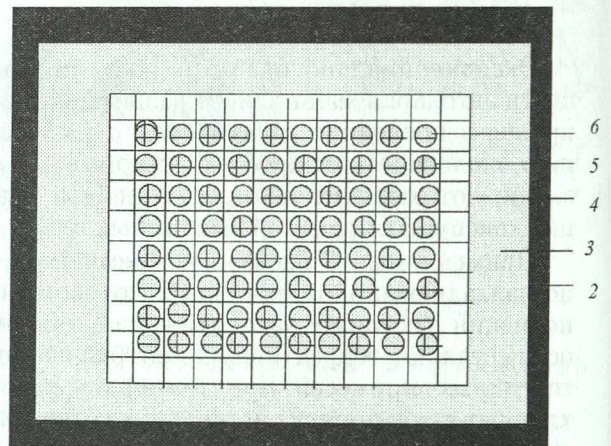


Рис. 2. Экспериментальная установка во фронтальном разрезе

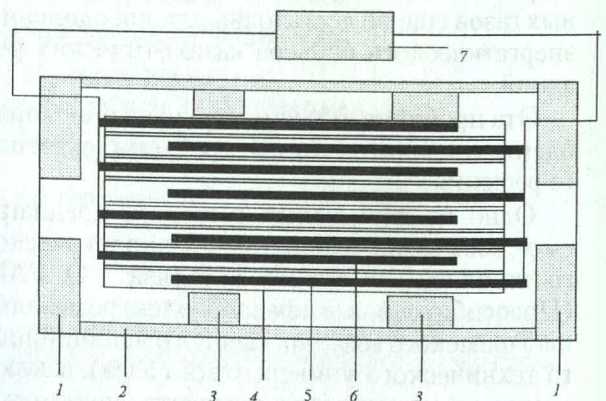


Рис. 3. Экспериментальная установка в продольном разрезе

Схемы экспериментальной установки во фронтальном и продольном разрезах представлены соответственно на рис. 2 и 3.

Экспериментальная установка состоит из диэлектрического корпуса 2, изолирующих

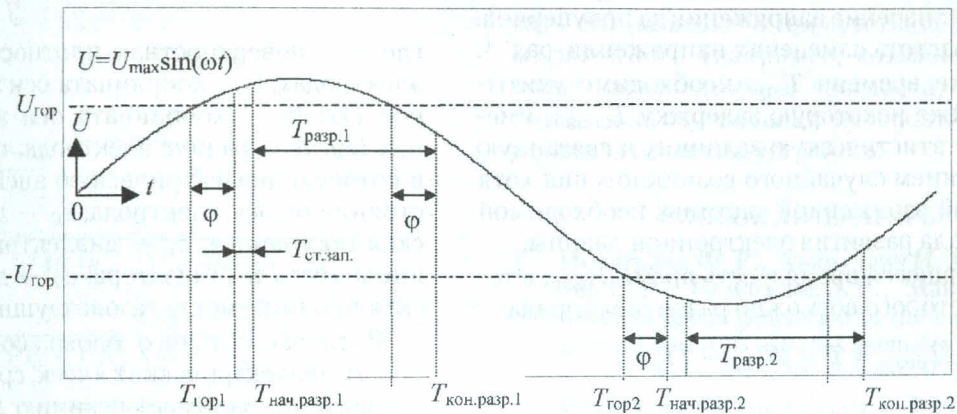


Рис. 4

стоек 3, в которых располагается диэлектрик-катализатор сотовой структуры 4, в ячейках которого располагаются в шахматном порядке относительно друг друга группы электродов одного 5 и другого 6 потенциала, подключенные к высокочастотному источнику переменного тока 7. По торцам установки расположены фланцы 1 с отверстиями для входа воздуха с токсичными примесями и выхода очищенного окислением озона воздуха соответственно.

Путем плавного регулирования частоты подаваемого напряжения экспериментально установлено, что интенсивная генерация озона (свыше 6 г/м<sup>3</sup> при расходе воздуха 22,5 л/ч и энергопотреблении 2 Вт) наблюдается в диапазоне частот 500–4000 Гц. При частоте свыше 4000 Гц имеет место концентрация озона на уровне 10–15 мг/м<sup>3</sup> с выбросами до 20 мг/м<sup>3</sup> при расходе воздуха 9 л/ч. При низких частотах порядка 300 Гц наблюдается и концентрация озона 40 мг/м<sup>3</sup>.

В то же время при частоте 4 кГц, которая, по данным экспериментов, является верхней границей оптимального для озонотенерации участка частоты, длительность полупериода составляет 125 мкс, т. е. близка к времени запаздывания начала ионизационных процессов.

Таким образом, в данном случае резкое снижение эффективности озонотенерации при частотах свыше 4 кГц связано с тем, что питающее напряжение попадает в диапазон «мертвой» зоны частот.

При частотах свыше первой критической частоты, возможность для вычисления которой предоставляет разработанная математическая модель, интенсивность газоразрядных процессов, равно как и озонотенерации, снова возрастает.

Итак, математическая модель предсказывает для данной конструкции озонатора с учетом его габаритов и геометрии диэлектрического наполнения существование в частотном диапазоне «мертвой зоны» и двух оптимальных интервалов, в которых генерация озона имеет высокую эффективность. Экспериментальные исследования, проведенные для первого оптимального интервала, показали значительную активность процесса образования озона, близкую к теоретическому пределу эффективности барьерного разряда, и прекращение этой активности при предсказанной частоте верхней границы данного оптимального интервала.

## 2. ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАПОЛНЕНИЯ НА ПРОЦЕСС РАЗВИТИЯ БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА

Другая важная характеристика барьерного разряда представляет собой время запаздывания  $T_{\text{зап}}$  момента начала разряда  $T_{\text{нач.разр.}}$  относительно времени достижения  $T_{\text{гор}}$  напряжения горения  $U_{\text{гор}}$ , которое может быть выражено через угол  $\varphi$ , связанный с коэффициентом мощности  $\cos(\varphi)$ .

Если от внешнего источника к озонатору приложено напряжение, имеющее синусоидальную форму, условия, необходимые для начала развития разряда в рабочем промежутке озонатора, появятся через некоторое время  $T_{\text{гор}}$ , когда напряжение достигнет уровня  $U = U_{\text{гор}}$  [3–5] (см. рис. 4)

$$T_{\text{гор}} = \frac{\arcsin \frac{U_{\text{гор}}}{U_{\text{max}}}}{\omega},$$

где  $U_{\text{гор}}$  — напряжение, при котором возможно начало развития разряда, В;  $U_{\text{max}}$  — макси-

мальное значение напряжения за полупериод, В;  $\omega$  — частота изменения напряжения, рад<sup>-1</sup>.

Кроме времени  $T_{\text{гор}}$ , необходимо учитывать также некоторую задержку  $T_{\text{ст.зап}}$ , имеющую статистическую величину и связанную с ожиданием случайного возникновения хотя бы одной заряженной частицы, необходимой для начала развития электронной лавины.

Оставшееся время и есть время  $T_{\text{разр}}$ , в течение которого возможно развитие разряда:

$$T_{\text{разр}} = T - 4T_{\text{гор}} - 2T_{\text{ст.зап}},$$

где  $T$  — время полупериода разряда.

Однако для того чтобы установить в рабочем промежутке озонатора напряжение горения, необходимо затратить работу на создание электрического поля, соответствующего этому потенциалу, на перемещение зарядов внутри проводника электродов, на поляризацию диэлектрических структур озонатора. Наличие последних можно сравнить с присутствием магнитного сердечника, гистерезис которого требует дополнительных энергетических затрат на перемагничивание материала, т. е. переориентацию магнитных доменов. Диэлектрик в переменном электрическом поле также требует дополнительных энергетических затрат на собственную переполаризацию и изменение ориентации молекулярных диполей. Время, необходимое на исполнение этой работы, зависит от энергетических характеристик электрических полей, определяемых геометрией диэлектрических структур озонатора.

Выражение, определяющее потенциал в некой произвольной точке  $M$  с координатами  $x, z$  внутри диэлектрической соты, по оси которой расположен линейный заряд, сводится, с учетом конечности диаметра центрального электрода, к уравнению

$$U_M = \frac{\tau}{4\pi\epsilon_0} \left( \ln \left[ \frac{r}{\sqrt{(x)^2 + (z)^2}} \right] + \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} \left( \left( \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + \epsilon_1} \right)^{|i+j|} \times \right. \right. \\ \times \ln \frac{r}{\sqrt{(x - 2jl_0)^2 + (z - 2ih_0)^2}} + \\ \left. \left. + \frac{R}{2\sqrt{i^2 l_0^2 + j^2 h_0^2}} \left( \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + \epsilon_1} \right)^{|i+j|} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \ln \frac{r}{\sqrt{\left(x - \frac{R^2}{2jl_0}\right)^2 + \left(z - \frac{R^2}{2ih_0}\right)^2}} \right) \right),$$

где  $\tau$  — поверхностная плотность заряда на электродах;  $l_0$  — координата оси электрода по оси  $Ox$ ;  $h_0$  — координата оси электрода по оси  $Oy$ ;  $R$  — радиус электрода, помещенного в сотовую диэлектрическую ячейку;  $r$  — расстояние от оси электрода;  $\epsilon_0$  — диэлектрическая постоянная;  $\epsilon_1$  — диэлектрическая проницаемость катализатора;  $\epsilon_2$  — диэлектрическая проницаемость газозвушной смеси.

В случае сотового блока, состоящего из  $M \times K$  диэлектрических ячеек, среди которых исследуемая занимает позицию  $M_0, K_0$  и полярность электродов, расположенных по осям ячеек, имеет шахматный порядок, напряжение в некой произвольной точке с координатами  $x, y$  определяется выражением

$$U_M = \frac{\tau}{4\pi\epsilon_0} \ln \left[ \frac{r}{\sqrt{(x)^2 + (z)^2}} \right] + \\ + \sum_{m=0}^M \sum_{k=0}^K \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} \left( \frac{q}{4\pi\epsilon_0} (-1)^{|(m-m_0)+(k-k_0)|} \times \right. \\ \times \left( \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + \epsilon_1} \right)^{|i+j|} \times \\ \times \ln \frac{r}{\sqrt{(x - 2l_0((k-k_0)+j))^2 + (z - 2h_0((m-m_0)+i))^2}} + \\ \left. + \frac{R^{2q}}{4\pi\epsilon_0} (-1)^{|(m-m_0)+(k-k_0)|} \times \right. \\ \times \frac{1}{2\sqrt{((k-k_0)+j)^2 l_0^2 + ((m-m_0)+i)^2 h_0^2}} \\ \times \left( \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + \epsilon_1} \right)^{|i+j|} \times \\ \left. \times \ln \frac{r}{\sqrt{\left(x - \frac{R^2}{2l_0((k-k_0)+j)}\right)^2 + \left(z - \frac{R^2}{2h_0((m-m_0)+i)}\right)^2}} \right),$$

где  $q$  — заряд на поверхности электрода.

Для сотовой диэлектрической ячейки с линейным зарядом вдоль оси, исходя из вышеприведенной формулы, выражение для энергии поля может быть записано как

$$E = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left( \sum_{i=-\infty}^{k-1} \left\{ \sum_{j=-\infty}^{m-1} \psi + \sum_{j=m+1}^{\infty} \psi \right\} + \right. \\ \left. + \sum_{i=k+1}^{\infty} \left\{ \sum_{j=-\infty}^{m-1} \psi + \sum_{j=m+1}^{\infty} \psi \right\} \right),$$

где

$$\psi = \left( \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + \varepsilon_1} \right)^{|i+j+m+k|} \times \frac{r}{\sqrt{4l_0^2(k-j)^2 + 4h_0^2(m-i)^2}} + \frac{R}{2\sqrt{i^2l_0^2 + j^2h_0^2}} \left( \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + \varepsilon_1} \right)^{|i+j+m+k|} \times \frac{r}{\sqrt{(2l_0k - \frac{R^2}{2jl_0})^2 + (2h_0m - \frac{R^2}{2ih_0})^2}},$$

где  $q$  – заряд на поверхности электрода, который выражается через напряжение горения

$$q(U_{гор}) = 4\pi\varepsilon_0 U_{гор} \left( \ln \left[ \frac{r}{D} \right] - \ln \left[ \frac{r}{R} \right] \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} \left\{ \left( \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + \varepsilon_1} \right)^{|i+j|} \ln \frac{r}{\sqrt{(D - 2jl_0)^2 + (2ih_0)^2}} - \left( \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + \varepsilon_1} \right)^{|i+j|} \ln \frac{r}{\sqrt{(R - 2jl_0)^2 + (2ih_0)^2}} \right\} \right),$$

где  $D$  – радиус окружности, описанной вокруг ячейки.

Как показывает вышеприведенная формула, энергия электрического поля зависит от формы и материала диэлектрической структуры озонатора.

### ВЫВОДЫ

1. Расчет энергии электрических полей позволяет определить запаздывание начала разряда  $\varphi$  и коэффициент мощности  $\cos(\varphi)$ , оптимизация геометрии диэлектрика-катализатора позволяет повысить активную составляющую мощности барьерного разряда. Последнее, в частности, означает рост КПД озонатора.

2. Разработанная математическая модель рассматривает барьерный разряд во взаимодействии с электрическими полями диэлектрических структур и позволяет прогнозировать

его развитие в присутствии сложногогеометрического (например, сотового) диэлектрика-катализатора, в частности, оптимизировать частоту питания перспективных озонокаталитических устройств.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исмагилов Ф. Р., Хайруллин И. Х., Хайруллин С. Р., Исмагилов З. Р., Максудов Д. В. Study of ozone generation in the bed of heterogeneous catalysis of varies geometry // Eurasian Chem.-Technol. J. 2002. No. 4. P. 271–276.
2. Исмагилов Ф. Р., Максудов Д. В. Озон в автотранспорте // Автомобильный транспорт. 2002. № 6. С. 36.
3. Самойлович В. Т., Гибалов В. И., Козлов К. В. Физическая химия барьерного разряда. М.: Изд-во МГУ, 1989. С. 176.
4. Филишов Ю. В., Емельянов Ю. М. Об активной мощности озонаторов // Журнал физической химии. 1959. Вып. 33, № 5. С. 1042–1046.
5. Филиппов Ф. В., Емельянов Ю. М. Электрическая теория озонаторов. Статические вольтамперные характеристики озонаторов // Журн. физ. химии. 1958. Вып. 2, № 12. С. 1217–1223.

### ОБ АВТОРАХ



**Исмагилов Флюр Рашитович**, проф., зав. кафедрой электромеханики, проректор УГАТУ. Дипл. инж.-электромеханик (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по элементам и устройствам управления (УГАТУ, 1998). Тр. в обл. электромеханических преобразователей энергии.



**Максудов Денис Вилевич**, ст. преп. той же кафедры. Дипл. физик (БГУ, 1999). Канд. техн. наук (УГАТУ, 2002). Иссл. в обл. электрических полей в неоднородных средах.