

БАРЬЕРНЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ОЗОНАТОР С ВРАЩАЮЩИМСЯ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

С целью раскручивания озонируемого газа по разрядному промежутку цилиндрического барьерного электрического озонатора предлагается и исследуется возможность применения вращающегося магнитного поля. На основе уравнений Навье – Стокса и Максвелла получены аналитические выражения для составляющих вектора скорости и перепада давления в разрядном промежутке, которые важны при оптимизационных расчетах поля концентрации озона с целью максимизации производительности озонатора.

Для производства озона высокой концентрации в барьерном электрическом разряде придется применять ползучий (ламинарный) режим течения газа в разрядном промежутке озонатора (рис. 1), при котором насыщение озоном происходит в большей степени у стенок разрядного промежутка (1, 3) и в меньшей степени по центру потока газа в канале (2) [1]. Это обусловлено тем, что для каждого температурного режима в разрядном промежутке существует своя константа оптимальной энергии разряда, приходящейся на единицу объема газа. В результате получается озоно-воздушная смесь с невысокой средней концентрацией озона. Для повышения концентрации озона в этой ситуации предлагается принудительное перемешивание газа в разрядном промежутке.

Одним из способов перемешивания газа может служить увеличение его скорости течения при сохранении времени пребывания в разрядном промежутке неизменным. В случае трубча-

того озонатора этого можно добиться, дополнительно создавая в цилиндрическом канале течения газа тангенциальную составляющую вектора скорости. А так как в разрядном промежутке озонатора газ под действием радиального электрического поля приводится в состояние неравновесной плазмы и потому становится электропроводным, то тангенциальную составляющую вектора скорости ему можно придавать с помощью вращающегося магнитного поля. Моделированию течения газа в таком случае и посвящена настоящая работа.

Главными искомыми в задаче будут составляющие вектора скорости газа, так как они нужны для обобщенной нами ранее [2, 3] кинетики образования озона в барьерном электрическом разряде при ламинарном течении озонируемого газа в виде

$$\frac{dC}{dr} V_r + \frac{dC}{du} V_y + \frac{1}{\rho} \frac{dC}{d\varphi} V_\varphi - \frac{C V_\varphi}{\rho} = q[k_0 - k_1 C], \quad (1)$$

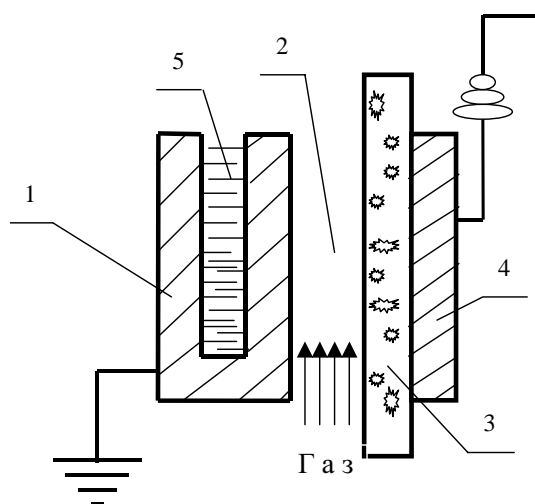
где $C(\rho, \varphi, y)$ – объемная концентрация озона, V_r , V_φ , V_y – составляющие вектора скорости газа в цилиндрической системе координат, q – объемная плотность мощности разряда в разрядном промежутке, k_0 и k_1 – соответственно константы образования и разложения озона [1].

Низкотемпературная плазма барьерного электрического разряда в озонаторе в данной работе рассматривается как электропроводный газ. На ток в газе предлагается воздействовать магнитным полем, создаваемым посредством катушки индуктивности, расположенной снаружи внешнего цилиндрического электрода озонатора (рис. 2).

Моделирование взаимосвязи участвующих полей в случае ламинарного режима течения газа можно провести на основе уравнения Навье – Стокса и уравнений Максвелла:

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \right) = -\text{grad } p + \eta \Delta \vec{V} + [\vec{j} \times \vec{B}], \quad (2)$$

$$\text{div } \vec{V} = 0, \quad (3)$$



- 1,4 – металлические электроды;
- 2 – разрядный промежуток;
- 3 – диэлектрический барьер;
- 5 – охлаждающая жидкость

Рисунок 1. Схема разрядного промежутка барьерного электрического озонатора

$$\text{rot } \vec{B} = \mu\mu_0 \vec{j}, \quad (4)$$

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (5)$$

$$\vec{j} = \sigma(\vec{E} + [\vec{V} \times \vec{B}]), \quad (6)$$

$$\text{div } \vec{B} = 0, \quad (7)$$

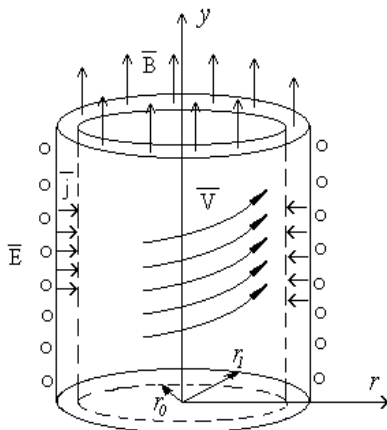
$$\text{div } \vec{j} = 0. \quad (8)$$

Здесь μ_0 – магнитная постоянная; μ – магнитная проницаемость среды; σ – проводимость среды; ρ – плотность среды; η – коэффициент динамической вязкости; p – давление; Δ – оператор Лапласа; $\vec{\nabla}$ – Набла-вектор.

Сразу можно отметить, что уравнения (7) и (8) являются следствиями уравнений (4) и (5), т. к. $\text{div}(\text{rot } \vec{A}) = 0$. Значит фактически здесь 13 уравнений с 13-ю неизвестными функциями.

По смыслу задачи можно положить в цилиндрической системе координат, что $V_r = 0$, $\frac{\partial}{\partial \theta}(\dots) = 0$, $\frac{\partial V_\alpha}{\partial y}(\dots) = 0$, и движение газа считать установившимся во времени. Тогда гидродинамические уравнения (2) и (3) преобразуются к виду:

$$\frac{V_\theta^2}{r} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial r}, \quad (9)$$



\vec{E} – напряженность приложенного электрического поля, обеспечивающего тихий разряд; \vec{B} – аксиально-направленное магнитное поле, синфазное току в газе; \vec{j} – электрический ток в газе; \vec{V} – поле скоростей частиц газа.

Рисунок 2. Схема полей озонатора с вращающимся магнитным полем

$$v \left(\frac{\partial^2 V_\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial r} - \frac{V_\theta}{r^2} \right) - \frac{1}{\rho} (j_r \cdot B_y) = 0, \quad (10)$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + v \left(\frac{\partial^2 V_y}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_y}{\partial r} \right) = 0, \quad (11)$$

$$\frac{\partial V_y}{\partial y} = 0. \quad (12)$$

Граничные условия к ним:

$$V_\theta|_{r=r_0} = V_\theta|_{r=r_1} = 0; \quad V_y|_{r=r_0} = V_y|_{r=r_1} = 0; \quad (13)$$

$$\frac{1}{r_1 - r_2} \int_{r_0}^{r_1} V_y(r) dr = V_{y, \text{cp}}. \quad (14)$$

Если обозначить

$$f = \frac{1}{\rho v} j_r B_y, \quad (15)$$

то легко показать, что решение уравнения (10) методом вариации произвольных постоянных после удовлетворения граничным условиям (13) можно получить в виде

$$V_\theta = \frac{f}{3r(r_1 + r_0)} (r^3(r_1 + r_0) - r^2(r_1^2 + r_1 r_0 + r_0^2) + r_0^2 r_1^2). \quad (16)$$

Подстановка полученного V_θ в (9) и его решение дают

$$p(r, y) = \frac{\rho f^2}{9(r_1 + r_0)^2} \left(\frac{(r_1 + r_0)^2}{4} r^4 - \frac{2}{3} (r_1 + r_0)(r_1^2 + r_1 r_0 + r_0^2) r^3 + \frac{1}{2} (r_1^2 + r_1 r_0 + r_0^2)^2 r^2 + 2(r_1 + r_0) r_1^2 r_0^2 r - 2r_1^2 r_0^2 (r_1^2 + r_1 r_0 + r_0^2) \ln r - \frac{1}{2} r_1^4 r_0^4 \frac{1}{r^2} \right) + C_3(y). \quad (17)$$

Подставляя полученное p в уравнение (11), получим

$$\frac{\partial^2 V_y}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_y}{\partial r} = \frac{1}{\rho v} \frac{\partial C_3}{\partial y}(y). \quad (18)$$

Левая и правая части уравнения (18) здесь не могут зависеть ни от r , ни от y , поэтому можно записать

$$\frac{\partial^2 V_y}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_y}{\partial r} = C_4, \quad \frac{1}{\rho v} \frac{\partial C_3}{\partial y} = C_4. \quad (19)$$

Решение (19) можно получить в виде

$$V_y = \frac{C_4}{4} r^2 + C_5 \ln r + C_6. \quad (20)$$

Удовлетворение граничным условиям (13) приводит (20) к виду

$$V_y = \frac{C_4}{4 \ln \frac{r_0}{r_1}} \left(r^2 \ln \frac{r_0}{r_1} + r_1^2 \ln \frac{r}{r_0} + r_0^2 \ln \frac{r_1}{r} \right). \quad (21)$$

Подчиняя (21) условию (14), находим, что

$$C_4 = \frac{12 V_{y \text{cp}} \ln \frac{r_1}{r_0}}{3(r_1^2 - r_0^2) - 2(r_1^2 + r_1 r_0 + r_0^2) \ln \frac{r_1}{r_0}}, \quad (22)$$

где

$$V_{y \text{cp}} = \frac{Q}{\pi(r_1^2 - r_0^2)}, \quad (23)$$

Q – расход озонируемого газа через озонатор.

Так как из (17) следует, что $\frac{\partial P}{\partial y} = C_3'(y)$, то с учетом (19) получаем $C_3'(y) = \rho v C_4$. Отсюда следует, что

$$C_3(y) = \rho v C_4 y + C_5. \quad (24)$$

Тогда из (17) получим с учетом (24) и (22), что

$$\Delta P = \frac{12 \rho v L V_{y \text{cp}} \ln \frac{r_1}{r_0}}{3(r_1^2 - r_0^2) - 2(r_1^2 + r_1 r_0 + r_0^2) \ln \frac{r_1}{r_0}}. \quad (25)$$

Здесь L – длина разрядной зоны. Окончательно с учетом (23) можно выразить

$$\Delta P = \frac{12 \rho v L Q \ln \frac{r_1}{r_0}}{\pi(r_1^2 - r_0^2)(3(r_1^2 - r_0^2) - 2(r_1^2 + r_1 r_0 + r_0^2) \ln \frac{r_1}{r_0})}, \quad (26)$$

$$V_y = \frac{3Q \left(r^2 \ln \frac{r_0}{r_1} + r_1^2 \ln \frac{r}{r_0} + r_0^2 \ln \frac{r_1}{r} \right)}{\pi(r_1^2 - r_0^2)(3(r_1^2 - r_0^2) - 2(r_1^2 + r_1 r_0 + r_0^2) \ln \frac{r_1}{r_0})}. \quad (27)$$

Среднее интегральное по зазору значение $V_{\theta \text{cp}}$ получается из (16) в виде

$$V_{\theta \text{cp}} = \left(\frac{r_1^2 r_0^2 \ln \frac{r_1}{r_0}}{r_1^2 - r_0^2} - \frac{r_1^2 + r_1 r_0 + r_0^2}{6} \right) \frac{f}{3}. \quad (28)$$

Обозначенное в (15) f можно вычислить как

$$f = -\frac{\mu \omega n \sigma J_0 U_0}{2 S} \sin \varphi_L,$$

где ω – круговая частота вращающегося магнитного поля; n – число витков катушки индуктивности; S – площадь электродов озонатора; J_0 – амплитудное значение тока в катушке; U_0 – амплитудное значение напряжения на электродах озонатора.

Список использованной литературы:

1. Самойлович В.Г., Гибалов В.И., Козлов К.В. Физическая химия барьерного разряда. – М.: МГУ, 1989. – 175 с.
2. Кузнецов В.А. Математическая модель тепломассообмена в барьерном электрическом озонаторе // Основные направления научно-методических исследований преподавателей физико-математического факультета Магнитогорского госпединститута. – Магнитогорск: МГПИ, 1992. – С. 8-16.
3. Кирко И.М., Кузнецов В.А. Применение математического моделирования при конструировании барьерных электрических озонаторов // Синтез озона и современные озонные технологии: Материалы 22-го Всероссийского семинара. – Москва: МГУ, 2001. – С. 55-64.