

трон-атомных столкновений в ксеноне существенно выше, чем в аргоне и тем более в гелии, вследствие большего, чем в других газах, сечения передачи импульса. Кроме того, для ксеноновой плазмы характерны более высокие, чем для других газов, значения плотности электронов при равных вложенных в плазму мощностях.

#### Литература

1. Александров А. Ф., Бугров Г. Э., Вавилин К. В., Керимова И. Ф., Кралькина Е. А., Павлов В. Б., Плаксин В. Ю., Рухадзе А. А. Исследование индуктивного ВЧ-разряда как самосогласованной системы. Часть II. Исследование параметров плазмы и эффективности поглощения ВЧ-мощности плазмой индуктивного ВЧ-разряда низкого давления// Прикладная физика. 2005. № 5.
2. Александров А. Ф., Бугров Г. Э., Вавилин К. В., Керимова И. Ф., Кондранин С. Г., Кралькина Е. А., Павлов В. Б., Плаксин В. Ю., Рухадзе А. А.// Физика плазмы. 2004. 30. № 5.
3. Вавилин К. В., Плаксин В. Ю., Ри М. Х., Рухадзе А. А.// ЖТФ, 2004. 74. № 5. С. 44—49.
4. Вавилин К. В., Плаксин В. Ю., Ри М. Х., Рухадзе А. А.// Там же. № 6.
5. Вавилин К. В., Плаксин В. Ю., Ри М. Х., Рухадзе А. А.// Там же.
6. Вавилин К. В., Плаксин В. Ю., Ри М. Х., Рухадзе А. А.// Физика плазмы. 2004. 30. № 8.
7. Александров А. Ф., Бугров Г. Э., Вавилин К. В., Керимова И. Ф., Кралькина Е. А., Павлов В. Б., Плаксин В. Ю., Рухадзе А. А. Исследование индуктивного ВЧ-разряда как самосогласованной системы. Часть I. Особенности, наблюдавшиеся при экспериментальном исследовании индуктивного ВЧ-разряда, помещенного во внешнее магнитное поле// Прикладная физика. 2005. № 4.
8. Александров А. Ф., Бугров Г. Э., Вавилин К. В., Керимова И. Ф., Кралькина Е. А., Павлов В. Б., Плаксин В. Ю., Рухадзе А. А. Исследование индуктивного ВЧ-разряда как самосогласованной системы. Часть III. Исследование влияния емкостной составляющей на параметры плазмы индуктивного ВЧ-разряда низкого давления// Прикладная физика. 2005.
9. Turner M. M., Liberman M. A.// Plasma Sources Sci. Technol. 1999. № 8. P. 313—324.
10. Piejak R. B., Godyak V. A., Alexandrovich B. M.// Plasma Sources Sci. Technol. 1992. № 1. P. 179—186.
11. Godyak V. A., Piejak R. B., Alexandrovich B. M.// Ibid. 1994. № 3. P. 169—176.

Статья поступила в редакцию 30 марта 2005 г.

## Examination of an inductive high-frequency discharge as the self-consistent system

### Part IV. Results of examination of an equivalent resistance for the inductive high-frequency discharge at a low pressure and without a magnetic field

*A. F. Aleksandrov, G. E. Bugrov, K. V. Vavilin, I. F. Kerimova, E. A. Kralkina, V. B. Pavlov, V. Yu. Plaksin*

Physical Faculty of the Moscow State University, Moscow, Russia

*A. A. Rukhadze*

General Physics Institute, Moscow, Russia

*In the fourth part of a series of operations it has been studied experimentally the efficiency of input of high-frequency power in the inductive discharge at a low pressure and without a magnetic field by measuring an equivalent resistance. Also it has been made matching the results of experiments with the results of numerical calculations, founded on theoretical investigations obtained earlier.*

УДК 620.179.16

## Явление очищения электродов барьерного озонатора при турбулентном режиме движения газа в нем

*И. М. Курко*

Пермский государственный университет, г. Пермь, Россия

*В. А. Кузнецов*

Магнитогорский государственный университет, г. Магнитогорск, Россия

*Показано, что самоочищение разрядных промежутков барьерных электрических озонаторов при турбулентном течении озонируемого газа происходит из-за преобладания гидродинамических сил (отрывающих посторонние твердые и жидкие частицы от поверхности электродов) над электрическими, притягивающими частицы к электродам. Обоснован вы-*

**вод: озонаторы с турбулентным режимом течения озонируемого газа в разрядных промежутках предпочтительнее озонаторов с ламинарным режимом.**

Одним из недостатков озонаторов, работающих в настоящее время на очистке воды, является необходимость их периодической остановки, разборки и профилактической чистки электродов. Это обусловлено образованием на стеклянных барьерах тонкого слоя из азотистых соединений и пыли. Загрязнение барьеров резко ухудшает их поверхностное сопротивление. Хорошее же поверхностное сопротивление диэлектрических барьеров является неременным условием сохранения состояния коронного (барьерного) разряда в воздушных промежутках озонатора [1]. Например, при сооружении небольшой озонной станции в г. Нытва (Пермская обл.), производительность которой не более 1 кг озона в час, пришлось установить два озонатора, однако в работе постоянно находится только один из них, а второй — в профилактической чистке по специальной технологии.

На лабораторных озонаторах "Микрозон" с ламинарным течением воздуха проверялось состояние озонаторов в течение 20—30 ч работы. При нормальной работе озонатора (в начале испытания) все его межэлектродное пространство равномерно заполнялось фиолетовым однородным свечением, озонатор издавал очень слабый звук низкой частоты (около 100 Гц), соответствующий электростатическим вибрациям электродов.

К концу испытаний на стеклянных барьерах этих озонаторов появлялись шнуровые поверхностные разряды, имеющие вид светящихся змеек, которые явно имели характер электрической дуги, так как излучали яркий белый свет. Изменялся и характер рабочего шума озонатора. При появлении шнуровых разрядов звук становился более высоким, а через несколько минут после этого раздавался резкий треск, и озонатор выходил из строя.

При разборке выяснялось, что шнуровой разряд переходил в искровой, стеклянный барьер в некоторых местах лопался, а в местах пробоя возникала электрическая дуга, которая разрушала аппарат.

Озонатор работает стабильно, если, не допуская пробоя в нем, промывать и высушивать его электроды. Однако эта профилактическая процедура связана с разборкой озонатора и очень трудоемка.

Ситуация резко меняется, если озонируемый воздух прокачивать через озонатор в турбулентном режиме. В этом случае число Рейнольдса  $Re$  достигает значений 3000—4000, что заведомо больше критического значения, характеризующего переход от ламинарного режима к турбулентному.

Цель работы — обоснование явления самоочистки разрядных промежутков озонаторов при турбулентном течении озонируемого газа.

Гипотеза исследования — самоочистение разрядных промежутков озонаторов при турбулентном течении озонируемого газа происходит из-за преобладания гидродинамических сил (отрывающих твердые и жидкие частицы от поверхности электродов) над электрическими, притягивающими их к электродам.

В связи с отмеченным выше производится расчет и сравнение электрических и гидродинамических сил, действующих на твердые и жидкие частицы, находящиеся в разрядном промежутке у поверхности электродов озонатора.

#### Расчет электрических сил

Для простоты считаем, что у частицы, находящейся в разрядном промежутке у поверхности барьера, форма шара с радиусом  $a$  и она имеет заряд  $q$  (рис. 1).

Притяжение заряженной частицы к поверхности стеклянного барьера происходит за счет электрического взаимодействия с ее зеркальным отображением в диэлектрике, которое имеет заряд  $q/\epsilon$ , где  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость стекла барьера. Сила притяжения, согласно закону Кулона, будет равна

$$F_{el} = \frac{q^2}{16\pi\epsilon^2\epsilon_0 a^2}. \quad (1)$$

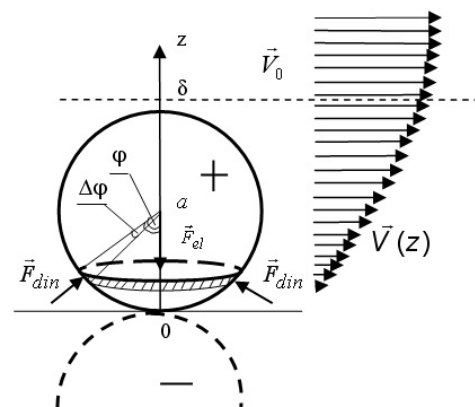


Рис. 1. Схема для расчета гидродинамических и электрических сил, действующих на заряженную частицу в разрядном промежутке барьерного электрического озонатора

Принимая во внимание, что разность потенциалов на электродах озонатора может расти только до напряжения пробоя воздуха  $V_r = 1,8 \cdot 10^6$ , считаем, что потенциал частицы на поверхности барьера возрастает от 0 до  $V_r$ . Среднее же его значение можно выбрать как  $0,5V_r$ . Электрическая емкость шарообразной частицы равна  $C = 4\pi\epsilon_0 a$ , поэтому среднюю величину ее заряда можно оценить как  $q = 2\pi\epsilon_0 a V_r$ . Подстановка этого значения в (1) дает выражение для расчета электростатической силы, притягивающей частицу к поверхности стекла

$$F_{el} \cong \frac{\pi\epsilon_0 V_r^2}{4\epsilon^2}. \quad (2)$$

#### Расчет гидродинамических сил

Силе электрического притяжения частицы противодействует гидродинамическая сила, возникающая за

счет большого градиента давления у стенки канала. Рассчитаем ее.

Относительная толщина пограничного слоя в воздухе при турбулентном его течении по разрядному промежутку может быть оценена согласно [2] приближенно как  $\delta \approx \Delta / \sqrt{\text{Re}}$ , где  $\Delta$  — толщина разрядного промежутка.

Зависимость продольной составляющей скорости частиц газа в пограничном слое приближенно определяется [2] как

$$V \approx V_0(1 - e^{-\frac{z}{\delta}}), \quad (3)$$

где  $z$  — расстояние точки на поверхности частицы от поверхности стеклянного барьера.

Согласно закону Бернулли в произвольной точке  $z$  имеем

$$\rho(z) + \frac{\rho V^2(z)}{2} = \text{const},$$

тогда для точки на поверхности частицы у электрода будем иметь

$$\rho(z) = \rho_0 + \frac{\rho V_0^2}{2} - \frac{\rho V^2(z)}{2}, \quad (4)$$

где  $\rho_0$  — статическое давление в основной части потока;  $V_0$  — продольная составляющая вектора скорости в основной части потока.

Из (4) с учетом (3) получаем

$$\begin{aligned} F_{\text{din}} = \Delta \rho(z) &= \rho(z) - \rho_0 = \frac{\rho V_0^2}{2} - \frac{\rho V^2(z)}{2} = \\ &= \frac{\rho V_0^2}{2} (1 - e^{-\frac{z}{\delta}})^2 = \frac{\rho V_0^2}{2} (2e^{-\frac{z}{\delta}} - e^{-\frac{2z}{\delta}}). \end{aligned}$$

Оставляя одну независимую переменную  $\varphi$ , выразим  $z$  как

$$z = a(1 - \cos\varphi). \quad (5)$$

Для определения силы, возникающей в результате образовавшегося перепада давлений и побуждающей частицу к отрыву от стенки, необходимо проинтегрировать по сферической поверхности частицы проекцию перепада давлений на ось  $Oz$ . На выделенный сферический пояс площади

$$\Delta S = 2\pi a^2 \sin\varphi \Delta\varphi$$

действует сила

$$\Delta F = \Delta \rho \cos\varphi \Delta S = \pi a^2 \rho V_0^2 (2e^{-\frac{z}{\delta}} - e^{-\frac{2z}{\delta}}) \cos\varphi \sin\varphi \Delta\varphi.$$

Интегрируя ее по всей сфере, с учетом (5) получаем

$$F = \pi a^2 \rho V_0^2 \int_0^\pi (2e^{-\frac{a}{\delta}(1-\cos\varphi)} - e^{-\frac{2a}{\delta}(1-\cos\varphi)}) \cos\varphi \sin\varphi \varphi d\varphi.$$

С помощью замены переменной и интегрирования по частям получаем

$$F = \frac{\pi a \delta \rho V_0^2}{2} (3 - \frac{7\delta}{2a} + 4e^{-\frac{2a}{\delta}} (1 + \frac{\delta}{a}) - e^{-\frac{4a}{\delta}} (1 + \frac{\delta}{2a})).$$

Если далее для удобства ввести характерные величины: динамическое давление в середине потока  $p_0 = \rho V_0^2/2$ , сечение частицы  $S_0 = \pi a^2$ , относительный диаметр частицы  $D_{ot} = 2a/\delta$  и безразмерную зависимость гидродинамической силы от относительного диаметра

$$\Phi(D_{ot}) = \frac{2}{D_{ot}} (3 - \frac{7}{D_{ot}} + 4e^{-D_{ot}} (1 + \frac{2}{D_{ot}}) - e^{-2D_{ot}} (1 + \frac{1}{D_{ot}})),$$

то размерная зависимость гидродинамической силы от относительного диаметра получится в виде

$$F(D_{ot}) = \rho_0 S_0 \Phi(D_{ot}). \quad (6)$$

### Обсуждение результатов расчетов

Сравнение результатов расчетов по (2) и (6) динамической и электрической сил, действующих на частицу при различных скоростях течения газа, приведено на рис. 2. Численные эксперименты проводились при толщине разрядного промежутка 3 мм. Соотношение сил подтверждает, что аэродинамическая сила является реально конкурирующей по отношению к силе электростатического притяжения. При увеличении числа Рейнольдса преобладание аэродинамической силы наступает при более малых радиусах частиц. Если же учесть, что расчет производился при максимуме электрической напряженности поля, то естественно считать, что отрываться турбулентным потоком от поверхности барьеров и выноситься из разрядного промежутка озонатора будут и частицы несколько меньшего диаметра.

Таким образом, озонатор "Аэрозон" с турбулентным режимом течения озонируемого газа работает в лаборатории авторов в течение пяти лет без профилактических чисток, и его электроды не загрязняются.

Следует добавить также, что при ламинарном режиме работы озонаторов из-за постепенного загрязнения электродов происходит снижение концентрации производимого озона и, соответственно, производительности озонатора [1]. При турбулентном же режиме такого не наблюдается [3]. Сокращение (в этом случае) времени пребывания озонируемого газа в разряде нужно компенсировать многократным его пропуском через разряд.

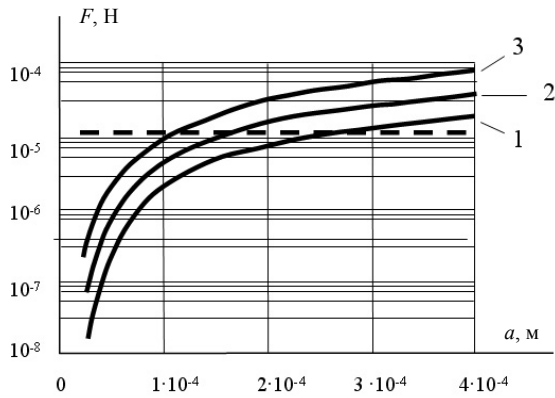


Рис. 2. Сравнение действующих на частицу сил в зависимости от ее радиуса:  
 ----- электрическая сила; ————— гидродинамическая сила;  
 1 — 12 м/с; 2 — 20 м/с; 3 — 30 м/с

Озонаторы с турбулентным режимом течения озонируемого газа в разрядных промежутках предпочтительнее озонаторов с ламинарным режимом.

#### Литература

1. Самойлович В. Г., Гибалов В. И., Козлов К. В. Физическая химия барьерного разряда. — М.: МГУ, 1989. — 175 с.
2. Лойцянский Л. Г. Ламинарный пограничный слой. — М.: Физматгиз, 1962. — 479 с.
3. Кирко И. М., Кузнецов В. А. Ламинарный и турбулентный режимы течения в плазме коронного разряда// Восьмой всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике (Пермь 23—29 августа 2001 г.): Аннотации докладов. — Екатеринбург: УрОРАН, 2001. С. 322.

Статья поступила в редакцию 24 мая 2004 г.

## The phenomenon the purification of electrodes of the barrier ozone generator at a turbulent mode movement of gas

*I. M. Kirko*

Perm state university, Perm, Russia

*V. A. Kuznetsov*

Magnitogorsk state university, Magnitogorsk, Russia

*Theoretically and experimentally the following phenomenon is investigated. In ozone generators at the turbulent current of gas there is an autopurification of electrodes. It is the result of prevalence of hydrodynamical forces above electric. The conclusion is proved: ozone generators with a turbulent mode of current the ozonized gas it is a better than ozone generators with a laminar mode.*

\* \* \*