

**Список литературы:** 1. ГОСТ 24183-80. Кабели силовые для стационарной прокладки. Общие технические условия. Введ. 01.01.82. – М.: Изд-во стандартов, 1989. 2. ГОСТ 28114-89. Кабели. Метод измерения частичных разрядов. Введ. 01.01.90. – М.: Изд-во стандартов, 1989. 3. МЭК 60502-2, 2004. Силовые кабели с экструдированной изоляцией и арматура к ним на номинальное напряжение от 1кВ ( $U_m = 1,2$  кВ) до 30 кВ ( $U_m = 36$  кВ). Часть 2 Кабели на номинальное напряжение от 6 кВ ( $U_m = 7,2$  кВ) до 30 кВ ( $U_m = 36$  кВ). 4. *Сканави Г.И.* Физика диэлектриков. – М., Л., 1958. 5. *Павлов П.В., Хохлов А.Ф.* Физика твердого тела. – М., 2000. 6. *Верещагин И.К.* и др. Физика твердого тела. – М., 1998. 7. *Харитонов Е.В.* Диэлектрические материалы с неоднородной структурой. – М., 1983. 8. *Усманов С.М.* Релаксационная поляризация диэлектриков. – М., 1996.

*Поступила в редколлегию 16.09.2008.*

УДК 537.523.3, 537.532.9

**А.И.ИВАНЬКИНА**, НТУ «ХПИ», Харьков

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ РАЗРЯДНОГО ПРОМЕЖУТКА В ЭЛЕКТРОДНЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

У статті розглядаються питання впливу частоти проходження і швидкості наростання фронту імпульсу напруги на електричну міцність газового проміжку.

In the paper, influence of pulse repetition frequency, rate of voltage pulse front rise on electrical strength of gas gap was investigated.

**Введение.** В высоковольтных электрофизических технологиях, таких как технология очистки питьевой и сточных вод, газоочистка, обработка материалов с целью изменения их свойств и т.д. применяются методы, основанные на воздействии на обрабатываемый объект продуктов газового разряда, полученного в электродной системе. Электрическая прочность газового промежутка в электродной системе зависит от конфигурации электрического поля и распределения в нем напряженности поля и ее величины, т.е. от конфигурации и геометрических размеров электродной системы, формы и длительности импульсов напряжения, питающего электродную систему, частоты их следования, скорости нарастания переднего фронта напряжения [1, 2, 3]. Нарушение электрической прочности газового промежутка происходит под действием ударной ионизации электронами за счет сил электрического поля, термической и фотоионизации. В электрическом поле с напряженностью  $\vec{E}$  на заряженную частицу, имеющую заряд  $q$  действует сила

$$\vec{F} = q\vec{E}. \quad (1)$$

Заряженные частицы приобретают энергию от поля

$$W = qx E, \quad (2)$$

где  $x$  – путь, пройденный частицей в направлении поля [4].

Чем активнее заряженные частицы, тем эффективнее процессы, происходящие в разрядном промежутке. Следовательно, при разработке технологического оборудования на основе газовых разрядов особенно в технологиях, где непосредственно в зону разряда вносятся обрабатываемые вещества, необходимо добиваться максимально допустимой электрической прочности газового промежутка с целью повышения эффективности и достижения стабильности горения разряда [5, 6, 7].

Целью данной работы является экспериментальные исследования частоты следования и скорости нарастания фронта импульса напряжения на электрическую прочность газового промежутка и как следствие этого – увеличение эффективности технологических процессов.

**Экспериментальная установка.** Для проведения экспериментов была собрана экспериментальная установка, приведенная на рис. 1 (принцип работы описан в литературе [8]).

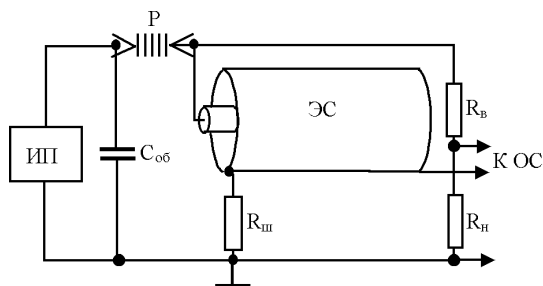


Рисунок 1 – Высоковольтный источник питания: И.п. – источник питания,  $C_{об}$  – обостряющая емкость, P – многозазорный искровой разрядник, ЭС – электродная система,  $R_{ш}$  – токовый шунт,  $R_{н}$  – низковольтное, плечо делителя напряжения,  $R_{в}$  – высоковольтное плечо делителя напряжения, ОС – осциллограф

Питание электродной системы осуществлялось импульсным напряжением (форма импульсов напряжения приведена на рис. 2), частота следования импульсов варьировалась от 700 Гц до 1000 Гц.

Для обострения фронта импульса напряжения использовался многозазорный искровой разрядник [9], позволяющий уменьшить время нарастания напряжения на электродной системе до 10 нс. Изменением величины обостряющей емкости  $C_{об}$  и суммарного зазора в разряднике достигалось частичное или полное обострение фронта импульса напряжения. Частичное обострение заключалось в том, что увеличенная скорость нарастания напряжения

6 кВ/нс имела место после срабатывания разрядника до 1/3 амплитудного значения импульса напряжения, если величина обостряющей емкости была 20 пФ, и 2/3 амплитуды, когда  $C_{об}=40$  пФ, затем напряжение в обоих случаях увеличивалось до максимального значения с меньшей скоростью, которую обеспечивал источник питания. При полном обострении фронта импульса напряжения скорость нарастания напряжения составляла 6 кВ/нс до амплитуды.

В процессе эксперимента проводились измерения частоты следования импульсов, импульсного напряжения и тока разряда при помощи осциллографа С8-13, низкоиндуктивного резистивного делителя напряжения, состоящего из двух резисторов ТВО ( $R_n = 50$  Ом,  $R_b = 1$  МОм) и низкоиндуктивного бифилярного шунта ( $R_{ш}=0,018$  Ом), изготовленного из нихромовой пластины толщиной 50 мкм. На рис. 2, 3 приведены осциллограммы напряжения, подаваемого на электродную систему и импульсы тока разряда [10].

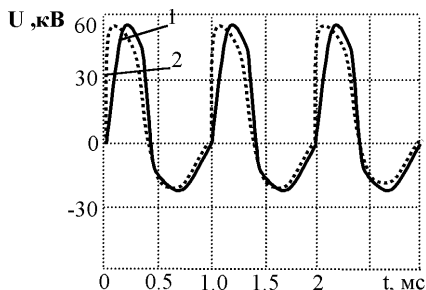


Рисунок 2 – Осциллограммы импульсов напряжения: 1, 2 - напряжение без обострения и с обострением фронта импульса напряжения соответственно

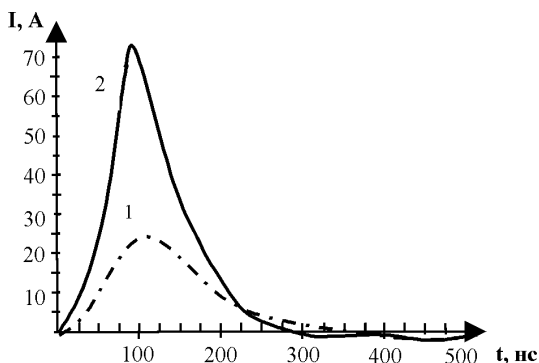


Рисунок 3 – Осциллограммы импульсов тока разряда: 1, 2 – импульсы тока разряда, протекающего без обострения и с обострением фронта импульса напряжения на электродной системе соответственно

Для практического подтверждения изменения наработки активных частиц с изменением электрической прочности промежутка измерялась концентрация озона газоанализатором «Циклон-5.11» российской фирмы «Оптэк», расход воздуха при продувке электродной системы составлял  $0,6 \text{ м}^3/\text{час}$ .

В эксперименте использовалась электродная система (рис. 4) для создания резконеоднородного поля: наназанные на стержень диски 1 из алюминиевой фольги толщиной 11 мкм, расположенные соосно металлическому цилиндру 2 диаметром 147 мм, диаметр алюминиевых дисков - 50 мм, расстояние между дисками – 20 мм [11]. Стержень с дисками – высоковольтный электрод, цилиндр – низковольтный электрод.

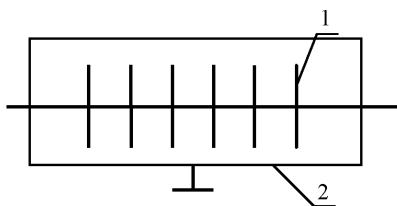


Рисунок 4 – Электродная система для резконеоднородного поля

**Обсуждение результатов.** На рис. 5 приведена зависимость амплитуды импульсного напряжения на электродной системе от тока, потребляемого источником питания после выпрямителя при частоте следования импульсов напряжения 700 Гц и 1000 Гц и полном и частичном обострении фронта импульса напряжения, питающего электродную систему: 1, 2/3, 1/2, 0 – соответственно обострение фронта импульса напряжения до полной амплитуды, до двух третей, до половины амплитуды и без обострения фронта импульса напряжения. Из графиков следует, что обострение фронта напряжения даже до половинной амплитуды (скорость нарастания фронта напряжения  $6 \text{ кВ/нс}$  длится до достижения 1/2 амплитуды напряжения) позволяет увеличить электрическую прочность газового промежутка на 35%. С увеличением частоты с 700 Гц до 1000 Гц электрическая прочность падает.

Обобщенные данные приведены в рис. 6, где на оси ординат отложено значение предпробивного напряжения, то есть такого максимального предпробивного напряжения, при котором разряд еще не переходит в искровой. На рис. 5 это напряжение соответствует точке, выше которой небольшой прирост напряжения приводит к резкому увеличению тока. По оси абсцисс отложено отношение амплитудного значения обостренного напряжения  $U_{об}$  к максимальной амплитуде напряжения ( $U_{об}/U_m$ ). Анализ результатов показывает, что с увеличением ( $U_{об}/U_m$ ) электрическая прочность газового промежутка существенно возрастает.

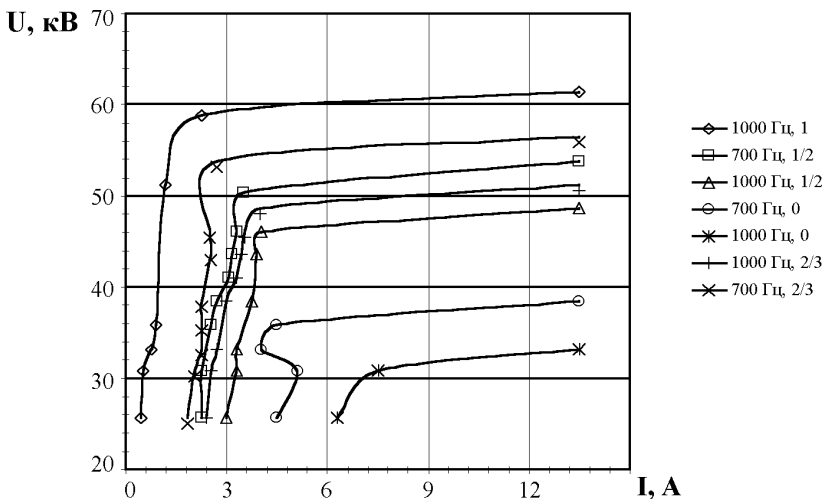


Рисунок 5 – Зависимость амплитуды напряжения от тока при частоте следования импульсов 700 Гц и 1000 Гц и полном и частичном обострении фронта импульса напряжении: 1, 2/3, 1/2, 0 – соответственно обострение до амплитуды напряжения, до двух третей, до половины амплитуды напряжения и без обострения

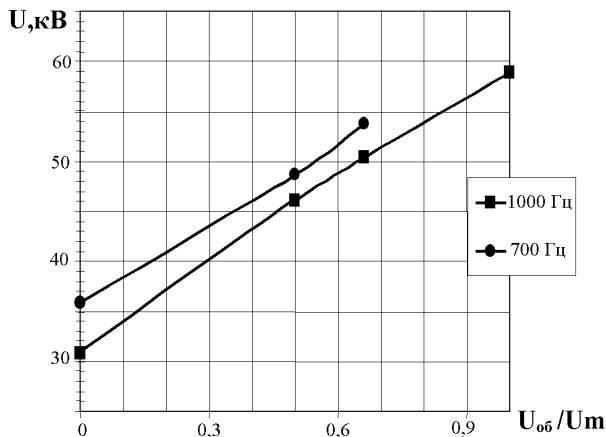


Рисунок 6 – Зависимость предпробивного напряжения электродной системы от относительной амплитуды обостренного импульса напряжения

Рис. 7 показывает эффективность наработки озона в электродной системе – реакторе экспериментальной установки. Здесь приведена зависимость концентрации озона от напряжения близкого к пробивному для частоты 1000 Гц

Из рис. 8 следует, что чем больше относительная амплитуда обострен-

ного напряжения, чем выше частота следования импульсов, тем более энергетически выгоден режим наработки активных частиц в электродных системах реакторов высоковольтных установок.

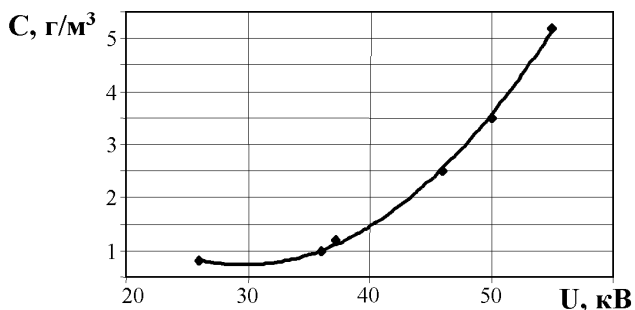


Рисунок 7 – Зависимость концентрации озона от напряжения для частоты 1000 Гц

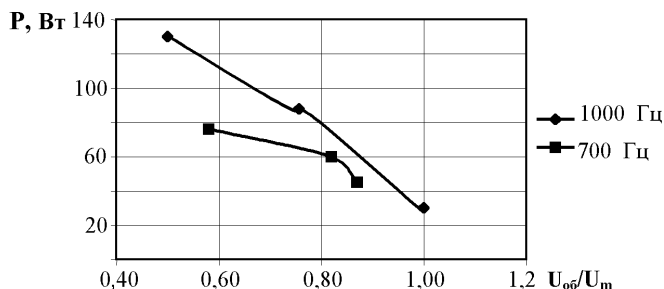


Рисунок 8 – Зависимость мощности, потребляемой от источника питания, от относительной амплитуды обостренного напряжения для частоты следования импульсов 1000 Гц, 700 Гц

## Выводы

Даже неполное обострение фронта импульсов напряжения, подаваемого на систему электродов, и оптимизация питания электродной системы позволяют существенно увеличить электрическую прочность в разрядном промежутке.

Повышение электрической прочности разрядного промежутка является энергетически более выгодным для наработки активных частиц, в частности, озона, по сравнению с разрядами, получаемыми в электрически менее прочных промежутках.

Описанные методы повышения электрической прочности нашли практическое воплощение в действующих электроустановках, изготовленных в отделе электрофизических технологий НИПКИ «Молния», и подтвердили свою высокую эффективность.

**Список литературы:** 1. *M.Petit, A.Goldman and M.Goldman*. Glow current in a point – to planol // I. Phys. D: Appl Phys. – V. 35. – 2002. – С. 2969-2977. 2. *T.Namihira, K.Shinozaki, S.Katsuki, R.Hackam, H.Akiyama and T.Sakugawa*. Characteristics of ozonizer using pulsed power // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – V 7. – 2002. – С. 107-115. 3. *Н.П.Поляков*. Наносекундные озонаторы // Приборы и техника эксперимента. – 2005. – № 5. – С. 126-129. 4. Высоковольтные электротехнологии // Учебное пособие / Под редакцией *П.П.Верещина*. – М.: МЭИ, 2000. 5. *И.В.Божко, И.С.Петухов, Н.И.Фальковский*. Электродная система для разрядных устройств с положительной стримерной короной // Техническая электродинамика. – 2006. – № 3. – С. 9-12. 6. *И.В.Божко, Н.И.Фальковский* Коронный разряд на поверхность электропроводящей жидкости и его использование для обработки воды // Техническая электродинамика. – 2007. – № 2. – С. 9-14. 7. *К.С.Стефанов* Техника высоких напряжений // Энергия. – 1967. – С 237. 8. *Бойко Н.И.* Научные основы создания электротехнологических установок для высоковольтных импульсных воздействий: Дисс. докт. техн. наук: 05.09.13 / НТУ «ХПИ». – Харьков, 2003. – 567 с. 9. *Бойко Н.И., Евдошенко Л.С., Зароченцев А.И.* и др. Высоковольтные искровые разрядники для технологических установок // Приборы и техника эксперимента. – 2000. – № 2. – С. 79-88. 10. *А.И.Иванькина, Л.С.Евдошенко* Критерий подхода к разработке озонаторного оборудования // Материалы 30 всероссийского семинара «Озон и другие экологически чистые окислители». – М.: МГУ, 2008. – С. 153-157. 11. Патент (РФ) № 2211800 от 10.09.20039 (Приоритет от 06.07.2001). Способ генерирования озона и устройство для его осуществления // *Н.И. Бойко* – напечатано в бюл. № 25 от 10.09 2003.

*Поступила в редколлегию 10.11.2008*

УДК 621.319.7.001

***В.В.КНЯЗЕВ***, канд.техн.наук, НТУ «ХПИ», Харьков

## **АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О ПРОНИКНОВЕНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ЧЕРЕЗ КРУГЛОЕ ОТВЕРСТИЕ В СФЕРИЧЕСКОЙ ПРОВОДЯЩЕЙ ОБОЛОЧКЕ**

В статті наведено аналітичне рішення задачі проникнення електростатичного поля крізь круглу апертуру у кульовій металевій оболонці. Застосовано рішення інтегрального рівняння Фредгольма першого роду, яке описує розподіл зарядів на відповідній кульовій оболонці. Знайдене рішення дало змогу визначити межі застосування методу еквівалентних дипольних моментів в розрахунках структури поля, що проникає крізь апертури до оболонок. Це рішення використується як тест відповідних прикладних програм для ЕОМ.

An exact solution of the problem of electrostatic field penetration through the circular aperture in the conductive spherical shell has been presented in the paper. The solution of the Fredholm equation of the first kind, which describes the distribution of the surface charge, has been used. The obtained solution has permitted to determine the error of the usage of the equivalent dipole moments method at the calculations of the structure of the field, which penetrates through apertures into shells. This solution is used as a test of the corresponding software.

### **Введение**

Обеспечение соответствия радиоэлектронной и электронной аппарату-