

DOI 10.15589/jnn20170409
 УДК 537.523
 Б73

**SPECIAL FEATURES OF THE IMPACT OF CORONA DISCHARGE
 ON STRING ELECTRODES IN ELECTROFILTRATION SYSTEMS**

**ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ КОРОННОГО РАЗРЯДА НА ПОВЕДЕНИЕ
 ЭЛЕКТРОДА-СТРУНЫ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРАЦИИ**

Leonid Z. Boguslavskiy
 dpes@iipt.ua
 ORCID: 0000-0001-6738-1889

Serhiy V. Chushchak
 chushchak89@gmail.com
 ORCID: 0000-0002-8495-3137

Volodymyr V. Kunizhenkov
 dpes@iipt.ua
 ORCID: —

Л. З. Богуславский,
 канд. техн. наук, доц.^{1,2}

С. В. Чушчак,
 мл. науч. сотр.¹

В. В. Куниженков,
 вед. инж.¹

¹*Institute of Pulse Processes and Technologies of NAS of Ukraine, Mykolaiv*

²*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*

¹*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев*

²*Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев*

Abstract. The impact of the corona space discharge on the behavior of the string electrode in the coaxial electrode systems of the gas emission electrofiltration complexes has been subject to study. The dependencies of the rotational amplitude of the string electrode on the applied voltage and the wire material are determined.

Keywords: corona space discharge; electrode system; electrofiltration of industrial gases; discharge ignition modes; oscillations; streamer.

Анотація. Досліджено вплив коронного об’ємного розряду на поведінку електрода-струни коаксіальних циліндричних електродних систем у комплексах електрофільтрації газових викидів. Визначено залежності амплітуди обертання струнного електрода від напруги й матеріалу дроту.

Ключові слова: коронний об’ємний розряд; електродна система; електрофільтрація промислових газів; режими запалювання розряду; коливання; стример.

Аннотация. Исследовано влияние коронного объемного разряда на поведение электрода-струны коаксиальных цилиндрических электродных систем в комплексах электрофильтрации газовых выбросов. Определены зависимости амплитуды вращения струнного электрода от подаваемого напряжения и материала проволоки.

Ключевые слова: коронный объемный разряд; электродная система; электрофильтрация промышленных газов; режимы зажигания разряда; колебания; стример.

REFERENCES

- [1] Boguslavskiy L. Z., Miroshnichenko L. N., Kazaryan Yu. G., Yaroshinskiy N. S. Vliyanie rezhimov raboty vysokovoltного istochnika pitaniya na formirovanie strimernogo koronnogo razryada i effektivnost sistem gazoochistki [Effect of high voltage power supply modes on the formation of a streamer corona discharge and efficiency of gas purification systems]. *Tekhnichna elektrodynamika. Tem. vyp. Sylova elektronika ta enerhoefektyvnist. [Technical electrodynamics. Power Electronics and Energy Efficiency].* 2011, pp. 44–49.
- [2] Boguslavskiy L. Z., Yaroshinskiy N. S. Ochistka vody vysokochastotnym strimernym razryadom [Water purification with a high-frequency streamer discharge]. *Sbornik nauchnykh trudov NUK — Collection of scientific publications of NUOS, Nikolaev, NUK Publ.,* 2015, no. 5 (461), pp. 88–93.
- [3] Boguslavskiy L. Z., Miroshnichenko L. N., Diordiychuk V. V., Vinnichenko D. V., Yaroshinskiy N. S. Sozdanie maketnykh obraztsov vysokovoltного oborudovaniya kompleksnykh sistem elektrofiltratsii ekologicheski opasnykh promyshlennykh vybrosov [Creation of prototypes of the high-voltage equipment for complex electrofiltration systems processing environmentally hazardous industrial emissions]. *Vestnik «KhPI». Tem. vyp. «Tekhnika*

- i elektrofizika vysokikh napryazheniy» — Bulletin of the Kharkiv Polytechnic Institute. Topic of the issue: High-voltage engineering and electrophysics. *Kharkov, NTU «KhPI» Publ., 2012, no. 52 (958), pp. 31–39.*
- [4] Boyko N. I., Konyaga S. F. Obrabotka gazov impulsnym koronnym razryadom [Gas treatment with a pulse corona discharge]. Vestnik «KhPI». Tem. vyp. «Tekhnika i elektrofizika vysokikh napryazheniy» — Bulletin of the Kharkiv Polytechnic Institute. Topic of the issue: High-voltage engineering and electrophysics. *Kharkov, NTU «KhPI» Publ., 2012, no. 52 (958), pp. 39–41.*
- [5] Rodionov A. I., Klushin V. N., Sister V. G. Tekhnologicheskie protsessy ekologicheskoy bezopasnosti [Technological processes of ecological safety]. Kaluga, Bochkareva N. Publ., 2000. 800 p.
- [6] Chekalov L. V. Osnovy razrabotki i konstruirovaniya elektrofiltrov novogo pokoleniya [Fundamentals of design and development of a new generation of electrostatic precipitators]. InformTsement Publ., 2006, no 5, pp. 67–69.
- [7] Edgar Choueiri. New Dawn for Electric Rockets. Available at: <https://www.nature.com/scientificamerican/journal/v300/n2/full/scientificamerican0209-58.html>.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Проблемы пылегазоочистки промышленных выбросов с целью защиты атмосферы от загрязнения экологически опасными веществами являются актуальными [5, 6]. В последнее время все более широко применяется коронный объемный разряд в системах комплексной электрофильтрации. Установлено, что для возбуждения коронных объемных разрядов в электрофильтрах большое значение имеют конструктивные особенности электродных систем [4].

Несмотря на значительное количество проведенных исследований, многие вопросы по зажиганию и поддержанию стабильного объемного разряда на различных конструкциях электродных систем, используемых в промышленных электрофильтрах, на сегодняшний день остаются открытыми и требуют дополнительного изучения.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Использование коронного объемного разряда в комбинированных системах электрофильтрации промышленных выбросов характеризуется своей спецификой, вызванной особенностями конструкции электродных систем и технологическими свойствами электрофильтров [1].

При анализе разнообразных электродных систем, употребляющихся в газоочистных комплексах, были выявлены определенные отрицательные эффекты: неоднородная обработка всего объема газа в системе, обрыв электрода-струны в месте пробоя и образования дугового разряда [1, 3, 4]. Для предотвращения их влияния на результаты работы газоочистных комплексов необходимы дополнительные исследования этих явлений. В данном случае рассматривается недостаточно изученная коаксиальная цилиндрическая электродная система, которую в последнее время начали применять в комплексных системах газоочистки.

ЦЕЛЬЮ РАБОТЫ является выявление особенностей применения коронного объемного разряда в коаксиальной цилиндрической системе электрофильтрации промышленных газовых выбросов, а так-

же определение влияния конструкции коаксиальной цилиндрической электродной системы и электромеханических процессов, воздействующих на электродную систему, в частности реактивной тяги коронного разряда, на электрод-струну и режимы электрофильтрации.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

С целью более глубокого анализа поведения коаксиальной цилиндрической электродной системы при ее использовании в комплексных системах электрофильтрации разработан экспериментальный стенд (рис. 1).

Стенд состоит из электрода-струны, выполненного из медной или никромовой проволоки 6 (катод), и металлического цилиндра 4 (анод), подключенных к высоковольтному высокочастотному импульсному источнику питания (ГВВИ). Трансформатор ГВВИ имеет коэффициент трансформации равный 277.

При подаче напряжения на коаксиальную цилиндрическую электродную систему 4, 6 в пространстве цилиндра вокруг электрода-струны образуется объемный коронный разряд 5. При дальнейшем поднятии

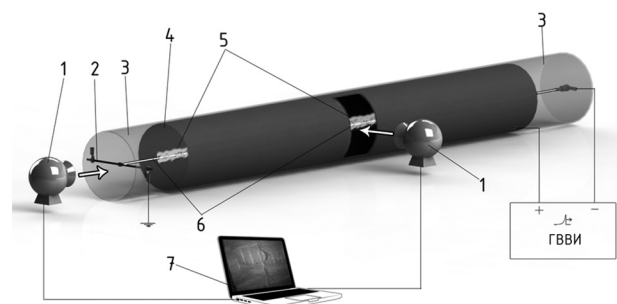


Рис. 1. Экспериментальный стенд с коаксиальной цилиндрической электродной системой:

1 — камера для видеофиксации; 2 — шпилька для крепления и регулировки натяжения проволоки; 3 — диэлектрический цилиндр (пластиковая труба); 4 — металлический цилиндр (анод-электрод «+»); 5 — объемный разряд (плазма); 6 — проволока (катод-электрод «-»); 7 — компьютер для наблюдения процесса через камеры видеофиксации и обработки результатов экспериментов

напряжения на электроде-струне в местах микронеровностей формируются стримеры, которые по аналогии с ионным двигателем [7], передают ей импульс. Идет раскачка электрода-струны с постепенным нарастанием амплитуды. Колебания электрода-струны начинают вращение по эллипсоидной траектории. Кроме того, эллипс также оборачивается вокруг оси своего центра (оси крепления проволоки). Данный эффект был замечен во время испытаний разных типов коаксиальных цилиндрических электродных систем электрофильтров. Длина электрода-струны в электродной системе экспериментального стенда является постоянной и равна 1000 мм, однако она может меняться из-за теплового расширения.

При смене полярности электродов, эффекта колебания и вращения электрода-струны не наблюдалось. Заземлялся всегда электрод со знаком минус «-».

Колебания электрода-струны возникают в результате воздействия на него реактивной тяги, создающейся каждым отдельным стримером, что приводит его в колебательное движение. Однако из-за стохастичности расположения стримеров по всей рабочей поверхности электрода-струны и разнонаправленности векторов силы воздействия, колебания переходят во вращение.

В системах электрофильтрации эффект вращения электрода-струны коаксиальных цилиндрических электродных систем является паразитным, так как при больших площадях электрофильтров может возникать множество коронных стримерных разрядов, что приведет к «раскачке электрофильтра». При этом межэлектродное расстояние будет уменьшаться, что станет причиной пробоя межэлектродного промежутка и образования дугового разряда. В случае чего мощность будет выделяться на сопротивление дуги, и электрофильтр перестанет функционировать. Так же возможны повреждения рабочих поверхностей и самого электрооборудования. Таким образом, в системах электрофильтрации необходимо предотвращать появление данного эффекта.

Для генерации стримерного разряда применяются высокочастотные высоковольтные импульсы с длительностью импульса менее одной микросекунды, частотой следования импульсов до 10 кГц (рис. 2).

Генератор высоковольтных импульсов [3] (рис. 3) состоит из двух главных частей: 1) широтно-импульсного регулятора входного напряжения (чоппера); 2) силового генератора импульсов высокого напряжения и частоты с наносекундным фронтом нарастания.

Силовая часть генератора импульсов с коротким фронтом представляет собой однотактный генератор с параллельным включением транзисторного IGBT ключа $T1$, который содержит встроенный мощный антипараллельный диод. Основным дозирующим элементом является мощный импульсный конденсатор $C1$, присоединённый последовательно с первичной обмоткой высокочастотного импульсного трансформатора $Tr1$.

Работа схемы состоит из двух фаз. В первой фазе, при которой транзисторный IGBT ключ $T1$ разомкнут, происходит накачка энергии из источника питания в емкостный накопитель $C1$ по цепи $Tr1 - C1 - L1$. Во второй фазе осуществляется разряд емкостного накопителя $C1$ на $Tr1$ ключом $T1$. При этом разрядный ток имеет синусоидальную форму: первая полуволна тока протекает через ключ, а вторая – через антипараллельный диод IGBT ключа $T1$, размагничивая магнитопровод трансформатора $Tr1$.

Чопперный регулятор (buck — стабилизатор) напряжения собран по традиционной схеме, содержащей три основных силовых элемента: 1) высокочастотный IGBT ключ $T1$; 2) мощный высокочастотный

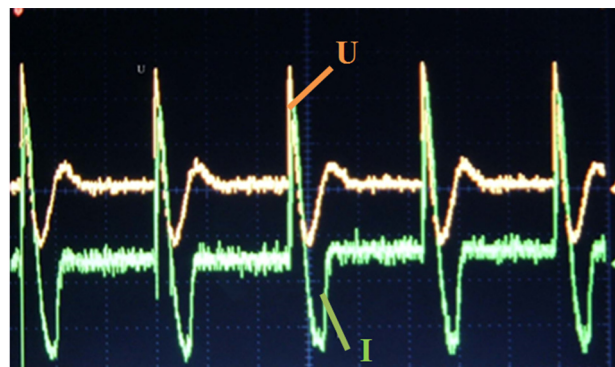


Рис. 2. Оциллограмма тока и напряжения высокочастотного стримерного разряда (развертка 250 мкс/дел.)

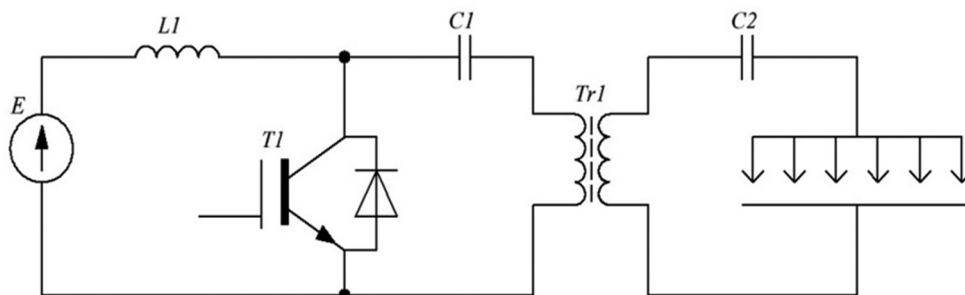


Рис. 3. Генератор высокочастотных импульсов высокого напряжения с наносекундным фронтом нарастания

диод с малым временем обратного восстановления; 3) выходной дроссель LI . Применение высокочастотного стабилизатора постоянного напряжения питания генератора импульсов с обратной связью по напряжению дало возможность расширить диапазон выходных напряжений высоковольтных импульсов.

Такое решение добавляет ряд дополнительных преимуществ, таких как независимость от скачков напряжения сети питания и расширенный диапазон выходных напряжений.

В результате передачи энергии через импульсный трансформатор и обостряющую ёмкость $C2$ на электродной системе наводятся импульсы высокого напряжения с наносекундным фронтом, которые образуют стримерный разряд (рис. 4).

Через некоторое время после зажигания стримерных разрядов электрод-струна начинает колебаться и затем вращаться по эллипсоидной траектории, которую можно наблюдать благодаря свечению плазмы (рис. 5).

Было проведено исследование зависимости амплитуды вращения от амплитуды подаваемого напряжения и материала электрода-струны. Амплитуда A

на графиках указана в относительных единицах и рассчитывалась по формуле $A=AI/d$, где AI — амплитуда и d — диаметр электрода-струны в миллиметрах.

Изучались электроды из медной ($d = 0,63\text{мм}$) и никромовой ($d = 0,35\text{ мм}$) проволоки. Использование медной проволоки большего диаметра, чем диаметр никромовой, обусловлено относительной легкоплавкостью меди. В экспериментах наблюдалось перегорание струны в месте пробоя.

Для равномерного натяжения образцов струн, применялся лабораторный комплект гирь массой 5, 10, 15 и 20 гр. Во всех случаях добивались одинакового отклонения для разного диаметра и материала электрода-струны.

Результаты исследования представлены на графиках (рис. 6, 7).

На графике (рис. 6) изображено скачкообразное увеличение амплитуды колебаний (A) медного струнного электрода при увеличении подаваемого напряжения с 22,16 кВ до 24,93 кВ. Повышение напряжения до 26,32 кВ не даёт столь значительного эффекта, а дальнейшее его увеличение может привести к пробое межэлектродного промежутка.



Рис. 4. Стримеры на электроде-струне в состоянии покоя



Рис. 5. Светящаяся траектория вращения электрода-струны

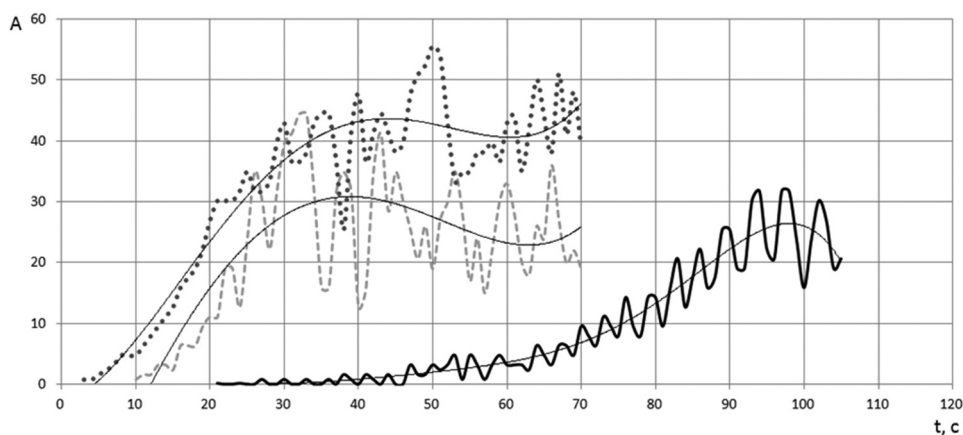


Рис. 6. Колебания медного электрода-струны ($d = 0,63\text{мм}$):

— 22,16 кВ; - - - 24,93 кВ; ••••• 26,32 кВ.

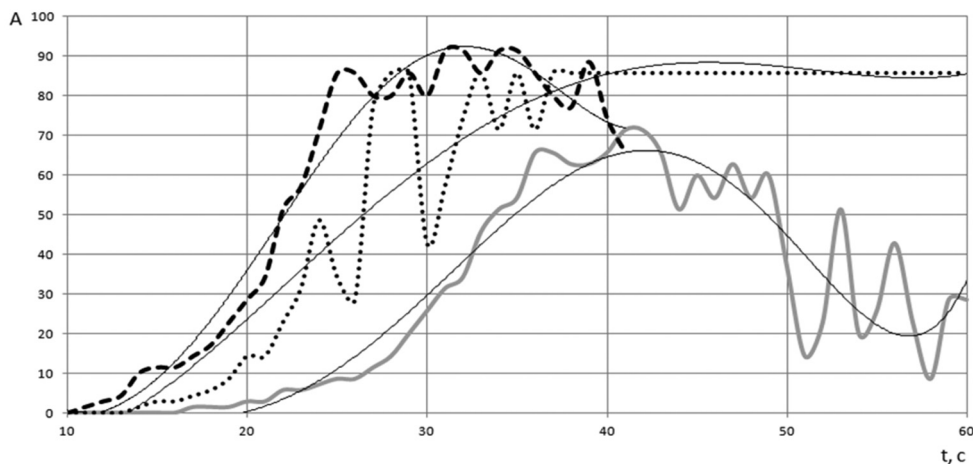


Рис. 7. Колебания нихромового электрода-струны ($d = 0,35$ мм):
 — 19,39 кВ; — 20,78 кВ; - · - · - — 22,16 кВ

На графике (рис. 7) колебания нихромового электрода-струны начинаются на более низких напряжениях, чем колебания медного электрода, а также со значительно большей величиной амплитуды. Обусловлено это разным диаметром проволоки соответственно разной массой. Кроме того, играет роль упругость материала самой проволоки (нихром более упругий по сравнению с медью).

Значительные колебания электродов-струн на графиках (рис. 6 и рис. 7) указывают не просто на изменение диаметра траектории вращения, а и на поворот эллипсоидной траектории вращения электрода-струны, которую видно благодаря свечению плазмы (рис. 5).

Результаты проведенных исследований необходимо учитывать при проектировании электродных систем электрофильтрационных газоочистных комплексов для устранения эффекта колебания и вращения электродов, который является паразитным в коаксиальных системах фильтра, так как влияет на устойчивость, работоспособность и ресурс электрофильтра.

В некоторых цилиндрических конструкциях коаксиальных электродных систем электрофильтра-

ции данный эффект наоборот будет положительным, поскольку позволяет обрабатывать больший объем проходящего газа через систему путем увеличения обрабатываемой площади поперечного сечения. Кроме того, создаёт турбулентные потоки в системе, что дает возможность с помощью перемешивания газов избавиться от эффекта «расслоения» обрабатываемого газа, когда со стороны одного электрода газ очищен, а со стороны противоположного электрода он остаётся загрязнённым.

ВЫВОДЫ. 1. В результате проведенных исследований влияния коронного разряда на электрод-струну в системах электрофильтрации определены зависимости амплитуды вращения электрода-струны от подаваемого напряжения и материала проволоки.

2. Использование полученных результатов при проектировании электродных систем электрофильтров позволит избежать эффекта раскачивания электрода-струны, который отрицательно влияет на поддержание стабильного стримерного коронного разряда в одних конструкциях. В усиленных конструкциях коаксиальных систем изученный эффект раскручивания электрода может существенно повысить эффективность электрофильтрации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Влияние режимов работы высоковольтного источника питания на формирование стримерного коронного разряда и эффективность систем газоочистки [Текст] / Л. З. Богуславский, Л. Н. Мирошниченко, Ю. Г. Казарян, Н. С. Ярошинский // Технічна електродинаміка. Тем. вип. Силова електроніка та енергоефективність. — Ч. 1. — 2011. — С. 44–49.

[2] **Богуславский Л. З.** Очистка воды высокочастотным стримерным разрядом [Текст] / Л. З. Богуславский, Н. С. Ярошинский // Сборник научных трудов НУК. — Николаев : НУК, 2015. — № 5 (461). — С. 88–93.

[3] Создание макетных образцов высоковольтного оборудования комплексных систем электрофильтрации экологически опасных промышленных выбросов [Текст] / Л. З. Богуславский, Л. Н. Мирошниченко, В. В. Диордийчук, Д. В. Винниченко, Н. С. Ярошинский // Вестник «ХПИ». Тем. вып. «Техника и электрофизика высоких напряжений». — Харьков : НТУ «ХПИ», 2012. — № 52 (958). — С. 31–39.

[4] **Бойко Н. И.** Обработка газов импульсным коронным разрядом [Текст] / Н. И. Бойко, С. Ф. Коняга // Вестник «ХПИ». Тем. вып. «Техника и электрофизика высоких напряжений». — Харьков : НТУ «ХПИ», 2012. — № 52 (958). — С. 39–41.

- [5] **Родионов А. И.** Технологические процессы экологической безопасности [Текст] / А. И. Родионов, В. Н. Клушин, В. Г. Систер. — Калуга : Изд-во Н. Бочкаревой, 2000. — 800 с.
- [6] **Чекалов Л. В.** Основы разработки и конструирования электрофильтров нового поколения [Текст] / Л. В. Чекалов // ИнформЦемент. — 2006. — № 5. — С. 67–69.
- [7] **Choueiri Edgar** New Dawn for Electric Rockets [Electronic resource] / Edgar Choueiri. — Available at: <https://www.nature.com/scientificamerican/journal/v300/n2/full/scientificamericasc0209-58.html>.

© Л. З. Богуславський, С. В. Чушак, В. В. Куніженков
Надійшла до редколегії 02.11.17
Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. *Н. І. Кускова*