

DOI 10.15589/jnn20150212
УДК 621.319.5
Б74

GENERATION AND APPLICATION OF HIGH-VOLTAGE HIGH-FREQUENCY STREAMER DISCHARGES FOR GAS TREATMENT

ГЕНЕРАЦІЯ І ПРИМЕНЕННЯ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВИСОКОЧАСТОТНИХ СТРИМЕРНИХ РАЗРЯДОВ ДЛЯ ГАЗООЧИСТКИ

Leonid Z. Bohuslavskiy
dpes@iipr.com.ua
ORCID: 0000-0001-6738-1889
Mykola S. Yaroshynskiy
kabalo@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-5884-5917

Л. З. Богуславский,
ст. науч. сотруд., канд. техн. наук, доц.
Н. С. Ярошинский,
мл. науч. сотруд.

Institute of Pulse Processes and Technologies of NAS of Ukraine, Mykolaiv
Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев

Abstract. The use of the high-voltage high-frequency streamer discharges for the destruction of environmentally hazardous gas emissions has been studied in the article. The operation of the generator of the high-voltage high-frequency pulses with a nanosecond rise time of the pulse is described as well. For generating a streamer discharge, the diode assembly of the series fast diodes parallel-connected to the load at the output of generator was applied. It allowed obtaining sharp pulses with a rise time less than 1 μ s. The use of the streamer discharge with sharp high-voltage high-frequency pulses reduced the concentration of the environmentally hazardous gases in the flue emissions. The NO gas concentration decreased by 4 times, the CO concentration decreased by 5.7 times, and the SO concentration decreased by 3.9 times.

Keywords: streamer discharge; gas treatment; high-voltage pulse generator.

Аннотация. Исследовано применение высоковольтных высокочастотных стримерных разрядов для деструкции экологически опасных газовых выбросов, а также описана работа генератора высоковольтных высокочастотных импульсов с наносекундным фронтом нарастания импульса. Для создания стримерного разряда применена диодная сборка из последовательно включенных быстрых диодов, подключенная параллельно нагрузке на выходе генератора. Это позволило получить острые импульсы с длительностью фронта менее 1 мкс. Использование стримерного разряда с острыми импульсами высокой частоты высокого напряжения снизило концентрацию экологически опасных газов в дымовых выбросах. Концентрация газа NO снизилась в 4 раза, концентрация CO уменьшилась в 5,7 раза, а SO — в 3,9 раза.

Ключевые слова: стримерный разряд; газоочистка; высоковольтный генератор импульсов.

Анотація. Досліджено застосування високовольтних високочастотних стримерних розрядів для деструкції екологічно шкідливих газових викидів, а також описано роботу генератора високовольтних високочастотних імпульсів з наносекундним фронтом наростання імпульсу. Для створення стримерного розряду застосовано діодну збірку з послідовно включених швидких діодів, підключену паралельно навантаженню на виході генератора. Це дозволило отримати гострі імпульси з тривалістю фронту, меншою за 1 мкс. Використання стримерного розряду з гострими імпульсами високої частоти високої напруги знизило концентрацію екологічно небезпечних газів в димових викидах: NO — в 4 рази, CO — в 5,7 рази, а SO — в 3,9 рази.

Ключові слова: стримерний розряд; газоочистка; високовольтний генератор імпульсів.

REFERENCES

- [1] Boguslavskiy L.Z., Miroshnichenko L.N., Kazaryan Yu.G., Yaroshinskiy N.S. Vliyanie rezhimov raboty vysokovoltnogo impulsnogo istochnika pitaniya na formirovanie strimernogo koronnogo razryada i effektivnost sistem gazoochistki [Influence of operating modes of a high-voltage pulse power source on the formation of a streamer corona discharge and the efficiency of the gas treatment systems]. *Tekhnichna elektrodynamika. Tematychnyi vypusk. Chastyna 1. — Technical Electrodynamics. Special Issue. Part 1*, 2011. pp. 44–49.
- [2] Dymova N.N. *Okhrana okruzhayushey sredy* [Environmental protection]. Moscow, Vyssh. shk. Publ., 2004. 606 p.

- [3] Mik D., Kregs D. *Elektricheskiy proboy v gazakh* [Electric breakdown in gases]. Moscow, Izdatelstvo inostranoy lit., 1960. 312 p.
- [4] Reter G. *Elektronnyie laviny i proboy v gazakh* [Electron avalanches and breakdown in gases]. Moscow, Mir Publ., 1968. 390 p.
- [5] Chekalov L. V. *Sostoyanie i perspektivy razvitiya impulsnogo pitaniya* [Current state and prospects of development of pulsed supply]. Moscow, TsINTIkhimneftemash Publ., 1991. 38 p.
- [6] Ashmarin G. V., Lelevkin V. M., Tokarev A. V. Development of Linear Corona Torch Discharge. *Plasma Physics Reports*, 2002, Vol. 28, no.10, p. 866.
- [7] Haydon S. C. Pre-breakdown discharges through isotopically enriched nitrogen: possible contributions from highly vibrationally excited molecules. *In Phenomena in Ionized Gases Proc: 12th Intern. Conf.*, Vienna, 1968, 495 p.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Современные технологии электрофильтрации газовых выбросов на примере тепловых электростанций имеют эффективность около 99% при удалении аэрозольных частиц [2]. Однако очистка от экологически опасных газов, например, CO, NO, SO_x, практически не проводится.

Необходимость разработки новых способов очистки газовых выбросов обусловлена актуальными задачами защиты атмосферы от загрязнения промышленными выбросами: увеличением требований к составу пыли и абразивных частиц после очистки, резким увеличением выбросов газов, требующих очистки, а также очистки от экологически вредных газовых примесей.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Основным путем повышения эффективности очистки газовых выбросов промышленных объектов является использование высоковольтных высокочастотных стримерных разрядов [5]. Стримеры представляют собой электронную лавину [3, 4, 7]. Электроны, вылетающие из головки стримера, взаимодействуют с частицами газа, что ведёт к диссоциации молекул, образованию свободных радикалов и выделению больших объёмов озона.

На рис. 1 на примере CO и NO представлена диссоциация экологически опасных газовых выбросов посредством реакций свободных радикалов и ионов CO, C, O, NO под действием низкотемпературной плазмы.

Схема превращений (см. рис. 1) показывает, что наличие озона O₃ не является необходимым условием для химических преобразований CO₂ и CO. Однако свободный радикал кислорода играет значительную роль в этом процессе.

Для зажигания и поддержки в значительных объёмах межэлектродного пространства высоковольтного высокочастотного стримерного разряда на многоострийной электродной системе электрофильтра необходимо подавать импульсы с частотой свыше 400 Гц, коротким фронтом нарастания до 1 мкс и напряженностью поля более 30 кВ/см [6]. Высокая ча-

стота стримерных разрядов необходима для зажигания сплошного факельного и объёмного разрядов.

Изложенное выше подчёркивает актуальность задачи создания источника высоковольтных высокочастотных стримерных разрядов и проведение исследований влияния генерируемых разрядов на газовые выбросы.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — разработка генератора высоковольтных высокочастотных импульсов с наносекундным фронтом нарастания для зажигания и поддержки стабильного стримерного разряда, а также исследование возможности его применения для очистки газовых выбросов от экологически опасных примесей.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Для зажигания и поддержки высоковольтного высокочастотного стримерного разряда был разработан высокочастотный генератор высоковольтных импульсов с фронтом нарастания менее 1 мкс, частотой повторения до 10 кГц и напряжением до 150 кВ (рис. 2, 3). Для генерирования импульсов с наносекундным фронтом в выходном каскаде использована схема с высоковольтной диодной сборкой на последовательно включённых быстрых диодах HVR-1X-3 на выходе импульсного трансформатора.

На первом этапе работы генератора (рис. 3) заряжается конденсатор C₁ от источника постоянного тока через катушку индуктивности L₁.

На втором этапе открывается транзистор VT₁ и энергия, накопленная в конденсаторе C₁, передается

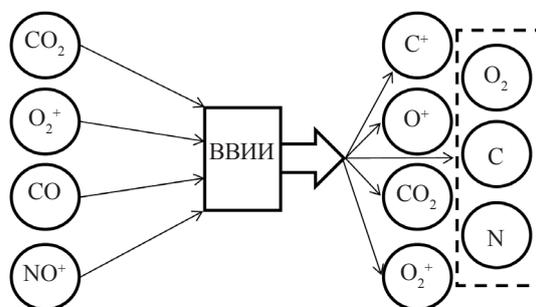


Рис. 1. Преобразование газов под действием низкотемпературной плазмы (ВВИИ — высоковольтный источник импульсов)



Рис. 2. Низковольтная часть генератора высоковольтных высокочастотных импульсов и общий вид экспериментальной установки

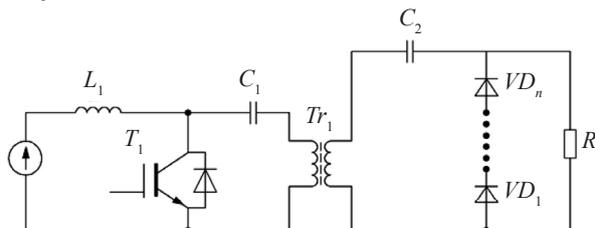


Рис. 3. Топология силовой части генератора высоковольтных высокочастотных импульсов

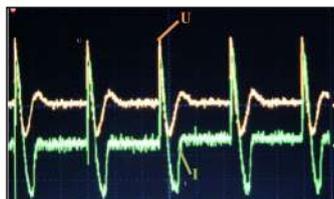


Рис. 4. Осциллограмма тока и напряжения высокочастотного стримерного разряда. Развертка 250 мкс/дел.



Рис. 5. Стримерный разряд в макете электрофильтра

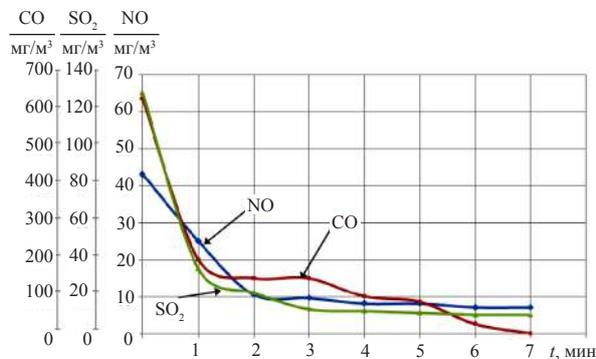


Рис. 6. Результаты измерений газоанализатором Testo 360 объемных долей составляющих выбросов дымового газа во время воздействия высоковольтного высокочастотного стримерного разряда

через трансформатор T_1 конденсатору C_2 через открытую диодную сборку $VD_1 \dots VD_n$ в прямом направлении.

На третьем этапе, когда конденсатор C_2 окажется полностью заряженным, импульсный трансформатор переходит в режим насыщения. Передача энергии прекращается. Энергия, накопленная в конденсаторе C_2 , будет передаваться через индуктивность насыщенного импульсного трансформатора. Ток в это время проходит в прямом направлении через высоковольтную диодную сборку $VD_1 \dots VD_n$.

На четвертом этапе в конце режима обратного восстановления диодов ток через них резко прерывается и энергия, накопленная в индуктивности насыщенного импульсного трансформатора, передаётся в нагрузку. Поскольку скорость отпириания диодной сборки очень высока, на нагрузке можно получить импульс с очень высокой скоростью нарастания фронта и резким спадом (рис. 4).

Объёмный стримерный разряд, необходимый для деструкции газовых выбросов, при подаче на многоострийную электродную систему высоковольтных высокочастотных импульсов с коротким фронтом от импульсного источника питания с заданной длительностью и частотой следования импульсов изображен на рис. 5.

Электрофизические процессы деструкции газовых выбросов были исследованы на экспериментальном стенде, который включал в себя многоострийную электродную систему, генератор высоковольтных высокочастотных импульсов, генератор дыма, а также измерительную аппаратуру. Детальное описание лабораторного стенда представлено в [1]. Генератор работал на частоте повторения импульсов до 7 кГц, с амплитудой напряжения до 60 кВ, в закрытом помещении при температуре 24 °С, атмосферном давлении 730 мм рт. ст. и относительной влажности 73%. Скорость потоков дымовых газов через электродную систему составлял 25 м/с.

В качестве источника дымовых газов использовали нитроцеллюлозу, полученную после обработки древесных опилок азотной кислотой, и затем в смесь добавляли серу. Во время эксперимента полученная субстанция подавалась термической обработке с последующим выделением дымовых газов, насыщеных оксидами азота NO и серы SO₂ (рис. 6).

Начальные концентрации составляли: SO₂ — 129 мг/м³, NO — 43 мг/м³, CO — 635 мг/м³. После включения генератора и выхода системы на рабочий режим приблизительно через 2 минуты значения выбросов составили: SO₂ — 33 мг/м³, NO — 10,5 мг/м³, CO — 110 мг/м³.

ВЫВОДЫ. Описанное исследование подтверждает возможность применения стримерных высокочастотных высоковольтных разрядов для очистки газовых выбросов от экологически опасных соединений.

Разработан генератор высоковольтных высокочастотных импульсов с фронтом нарастания менее 1 мкс.

Применение высоковольтных высокочастотных стримерных разрядов позволило снизить концентрацию экологически опасных газов для CO — с 635

до 110 мг/м³; NO — с 43 до 10,5 мг/м³; SO₂ — с 129 до 33 мг/м³.

Предложенный способ деструкции экологически опасных газовых выбросов обеспечивает эффективную деструкцию каждой из весомых составляющих газовой смеси.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Богуславский, Л. З.** Влияние режимов работы высоковольтного импульсного 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. — Тематичний випуск. — 2011. — Частина 1. — С. 44–49.
- [2] **Дымова, Н. Н.** Охрана окружающей среды [Текст] — изд. 4-е, испр. и доп. / Н. Н. Дымова ; под ред. С. В. Белова. — М. : Высш. шк., 2004. — 606 с.
- [3] **Мик, Д.** Электрический пробой в газах [Текст] / Д. Мик, Д. Крэгс. — М. : Изд-во иностранной лит., 1960. — 312 с.
- [4] **Петер, Г.** Электронные лавины и пробой в газах [Текст] / Г. Петер. — М. : Мир, 1968. — 390 с.
- [5] **Чекалов, Л. В.** Состояние и перспективы развития импульсного питания [Текст] / Л. В. Чекалов / Промышленная и санитарная очистка газов. — М. : ЦИНТИхимнефтемаш, 1991. — 38 с.
- [6] **Ashmarin, G. V.** Development of Linear Corona Torch Discharge [Text] / G. V. Ashmarin, V. M. Lelevkin, A. V. Tokarev // Plasma Physics Reports. — 2002. — Vol. 28. — № 10. — P. 866.
- [7] **Haydon, S. C.** Pre-breakdown discharges through isotopically enriched nitrogen: possible contributions from highly vibrationally excited molecules [Text] / S. C. Haydon // In Phenomena in Ionized Gases Proc: 12th Intern. Conf., Vienna, 1968. — P. 495.

© Л. З. Богуславський, М. С. Ярошинський
 Надійшла до редколегії 05.02.2015
 Статтю рекомендує до друку
 д-р техн. наук, проф. *Н. І. Кускова*