

УДК 621.314:621.373

ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАЗРЯДОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ДИОКСИДА СЕРЫ

А.В. Переверзев¹, докт. техн. наук, Т.Н. Литвиненко², ассист.

1 – Запорожский институт экономики и информационных технологий

ул. Кияшко, 16 Б, 69015, Запорожье, Украина

2 – Запорожская государственная инженерная академия,

пр. Ленина, 226, 69006, Запорожье, Украина

E-mail: tnlit@meta.ua

Приведены результаты сравнения электрофизических параметров коронного и стримерного разрядов. Показано, что применение стримерного разряда для очистки газов от диоксида серы является более предпочтительным. Сформулированы требования к электрическим параметрам импульсов высоковольтного преобразователя для более эффективного воздействия электрического разряда на диоксид серы. Приведены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие эффективность применения стримерного разряда для обезвреживания диоксида серы. Степень обезвреживания достигает до 96 %. Библ. 9, рис. 2, таблица.

Ключевые слова: электротехнология, электрический разряд, удаление диоксида серы, импульс высокого напряжения.

Введение. Современное конкурентоспособное промышленное производство прежде всего должно иметь высокоэффективные технологии, которые базируются на рациональном использовании сырьевых ресурсов, энергосбережении и снижении количества вредных выбросов. Развитию таких технологий способствует использование высоковольтной импульсной техники наносекундного и субмикронного диапазонов. Физический эффект от воздействия высоковольтных импульсов используется, в частности, для электросинтеза озона, дезинфекции воды и пищевых продуктов, стерилизации медицинstrumentа, обработки и очистки нефтепродуктов от примесей, накачки лазеров на парах металлов, удаления токсичных примесей из воздуха [2, 6, 9]. Обезвреживание диоксида серы, который содержится в отходящих промышленных газах, является актуальной задачей для Украины, так как он относится к веществам, наиболее загрязняющим окружающую среду [3].

Способы удаления диоксида серы из промышленных газов. Для обезвреживания диоксида серы используют абсорбционные, адсорбционные и каталитические методы. Наиболее распространенными из отмеченных методов очистки отходящих газов от диоксида серы являются абсорбционные, но за счет низкой сорбционной емкости существующих поглощающих растворов невозможно получить в промышленных условиях степень очистки газов от диоксида серы более чем 80 %. Адсорбционные методы являются предпочтительными лишь для газов, содержащих более чем 0,15 % диоксида серы и предварительно обеспыленных. Каталитические методы используют для газов, которые предварительно обеспылены и не содержат катализаторный яд [8].

В основу разработки высокоэффективного способа обезвреживания серосодержащих газов могут быть положены метод обработки газов электрическим разрядом и перспективный способ очистки газов от диоксидов серы с помощью активированных поглотительных растворов. Достоинством такого подхода является то, что при обработке серосодержащего газа электрическим разрядом при выработке озона для поглотительного раствора происходит попутное окисление диоксида серы озоном и химически активными радикалами, что повышает эффективность очистки газов от диоксида серы и приводит к снижению энергозатрат. При этом решающим фактором является удельная объемная мощность, которую удается создать в разрядном промежутке. С этой точки зрения большой интерес представляет высоковольтный импульсный разряд (десятки и сотни киловольт), с малой длительностью импульса (не более нескольких сотен наносекунд), исключая переход разряда в искровую форму и приводящей к резкому падению удельной мощности. Для формирования разряда такого типа

необходимы соответствующие высоковольтные импульсные источники энергии – высоковольтные импульсные преобразователи.

Оценка электрофизических параметров разрядов, формируемых преобразователями. Оценивая электрофизические параметры разрядов, следует остановиться на исследовании двух наиболее перспективных разрядов с целью их использования в электротехнологических установках для удаления диоксида серы из отходящих газов металлургических предприятий. Ими являются коронный и стримерный разряды. При оценке электрофизических параметров указанных разрядов будет рассматриваться электроразрядная система следующего вида: разрядной камерой являются коаксиальные цилиндры; радиус внутреннего электрода, роль которого играет проволока, $r = 0,05$ см; радиус внешнего цилиндра $R = 2,5$ см; атмосферное давление $p = 1$ атм; ионизационный потенциал для атома кислорода $U_{и} = 12,5$.

Для критического значения напряженности поля, при котором происходит зажигание короны в воздухе между коаксиальными цилиндрами, установлена эмпирическая закономерность [7]

$$E_K = 31 \cdot \delta_p \left(1 + 0,308 / \sqrt{\delta_p \cdot r} \right), \quad (1)$$

где δ_p – отношение плотности воздуха к нормальной, соответствующей $p = 760$ тор, $t = 25$ °С ($\delta_p = 1$); r – радиус внутреннего электрода, см. Для коаксиальных цилиндрических электродов напряженность поля зажигания короны E_K и напряжение коронирующего электрода U_K связаны соотношением

$$E_K = \frac{U_K}{r \ln(R/r)}. \quad (2)$$

Ионизационная область выглядит как слабое голубое свечение. В отличие от ровного свечения отрицательной короны, в положительной короне наблюдаются стримеры. Они выглядят как светящиеся нити, разбегающиеся от острия. В положительном коронном разряде высокое положительное напряжение прикладывается к электроду в виде проволоки малого диаметра, а на цилиндр большого диаметра подается отрицательная полярность. В таком случае коронирующая плазменная область совпадает с областью ионизации. Величина ионизационной области $x_{ио}$, где происходит размножение электронов в стадии лавин, определяется как

$$x_{ио} = r \frac{E_K}{E_1} - r, \quad (3)$$

где E_1 – напряженность поля, достаточная для ионизации воздуха электронными ударами, $E_1 = 24$ кВ/см, [6].

Ток «короны» i_K на 1 см длины разрядной камеры l составляет [7]

$$i_K = \frac{2\mu_a U(U - U_K)}{d^2 \cdot \ln(R/r)} \text{ А/см}, \quad (4)$$

где μ_a – подвижность ионов при $p = 1$ атм, $\mu_a = 2$, см/(В·с); U – текущее значение напряжения, приложенное к промежутку, В; d – расстояние между электродами, см.

Удельная мощность P_K , которая выделяется в коронном разряде, приведенная к 1 см³, имеет вид

$$P_K = \frac{U \cdot i_K}{\pi \cdot d^2 \cdot l}, \text{ Вт/см}^3. \quad (5)$$

Средняя энергия электрона $\bar{\varepsilon}$ при коронном разряде [1] следующая:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{e^2 \cdot E^2}{\delta \cdot m \cdot v_m^2}, \text{ эВ}, \quad (6)$$

где e – заряд электрона; m – масса электрона; ν_m – частота упругих столкновений; δ – коэффициент упругих потерь, который выбирается равным $\delta = 3,9 \cdot 10^{-3}$ (для воздуха), такие сведения приводятся в работе [7]; E – напряженность электрического поля.

Количество актов ионизаций K_u , т.е. неупругих столкновений при коронном разряде, равно

$$K_u = \frac{d \cdot \bar{\varepsilon}}{\lambda_s \cdot U_u}, \quad (7)$$

где $\bar{\varepsilon}$ – средняя энергия электрона, эВ; λ_s – длина свободного пробега электрона, $\lambda_s = 0,0565 \cdot 10^{-3}$, см; d – расстояние между электродами, см; U_u – ионизационный потенциал, эВ.

В отличие от «короны» стример представляет собой слабоионизированный канал, который образуется из первичной лавины в достаточно сильном поле и прорастает в ту или другую сторону к электродам [1].

Существуют два вида стримера: положительный (катодонаправленный) и отрицательный (анодонаправленный). В техническом плане интерес представляет катодонаправленный стример, так как для его образования необходимо создавать меньшую напряженность поля, чем для анодонаправленного.

Когда число электронов в лавине достигнет критического значения, то произойдет переход лавинного разряда в стримерный. Расчеты показывают, что при числе электронов $N_s \geq 10^7 - 10^9$ лавина переходит в стример [1]:

$$N_s = N_0 \exp(\alpha_{\text{эф}} d) \geq 10^8, \quad (8)$$

где N_0 – число начальных электронов; $\alpha_{\text{эф}}$ – коэффициент ударной ионизации с учетом эффекта прилипания; d – расстояние между электродами.

Поскольку поле в разрядной камере является резко неоднородным, а разрядный промежуток d меньше 5 см, то вероятность зарождения стримера вне области размножения первичных лавин очень маленькая, поэтому для обеспечения условий существования стримера критическое расстояние, которое проходит лавина $x_{\text{кр}}$, должно быть меньше или равно величине области зарождения первичных лавин $x_{\text{л}}$, т.е. $x_{\text{кр}} \leq x_{\text{л}}$. При этом $x_{\text{л}}$ определяется таким образом:

$$x_{\text{л}} = r \frac{E_{\text{л}}}{E_1} - r, \quad (9)$$

где E_1 – напряженность поля, достаточная для ионизации воздуха электронными ударами, $E_1 = 24$ кВ/см [7]; $E_{\text{л}}$ – среднее значение напряженности поля в области зарождения первичных лавин, $E_{\text{л}} = \frac{1}{x_{\text{л}}} \int_r^{x_{\text{л}}} \frac{U}{x \ln(R/r)} dx$.

Ток на длину l разрядной камеры (цилиндра) в промежутке между коаксиальными цилиндрами для стримерного разряда можно найти таким образом [5]:

$$\frac{i_{\text{стр}}}{l} = \frac{2\pi \cdot n_s \cdot e \cdot \mu_s \cdot U}{\ln(R/r)} \text{ А/см}, \quad (10)$$

где n_s – концентрация электронов в стримерном канале, см⁻³; μ_s – подвижность электронов, см²/(В·с); U – текущее значение напряжения, приложенное к промежутку, В.

Удельная мощность в стримерном разряде, приведенная к 1 см³ ($P_{\text{стр}}$):

$$P_{\text{стр}} = \frac{i_{\text{стр}} \cdot U \cdot t_{\text{и}} \cdot f}{\pi \cdot d^2 \cdot l}, \text{ Вт/см}^3. \quad (11)$$

где $t_{\text{и}}$ – длительность импульсов; d – расстояние между электродами, см; f – частота следования импульсов.

Средняя энергия электрона и количество актов ионизаций при стримерном разряде определяются по формулам (6) и (7) соответственно.

По соотношениям (1)...(11) можно оценить возможность создания объемного разряда и эффективность воздействия на обрабатываемый газ, а также уровень энергии, которая потребляется от источника питания при формировании коронного или стримерного разряда. Полученные результаты оценок сведены в таблицу.

Из таблицы видно, что стримерный разряд, несмотря на значительно большие энергозатраты в сравнении с коронным разрядом, обладает рядом достоинств, которые могут иметь решающее значение для применения его в технологических установках газоочистки. Значительным преимуществом можно считать то, что стримерный разряд, при выполнении условий его зарождения и поддержания, занимает весь объем разрядной камеры. Другим не менее важным достоинством стримерного разряда является более высокая энергия электронов по сравнению с коронным разрядом, что обеспечивает более интенсивные процессы ионизации молекул или атомов, обрабатываемого разрядом газа.

Определение параметра	Обозначение параметра и единицы измерения	Величина параметра	
		Корона	Стример
Напряжение, подаваемое на коаксиальные электроды	U , кВ	18	50
Среднее значение напряженности поля в разрядном промежутке	E_{cp} , кВ/см	7	20
Удельная мощность, затрачиваемая на формирование разряда	P , Вт/дм ³	11,2	357
Средняя энергия, которую электрон приобретает в поле	$\bar{\varepsilon}$, эВ	1,785	14,57
Количество неупругих столкновений электроном в лавине	—	6200	50540
Объем разряда по отношению к объему разрядной камеры	%	5,8	100

Требования к параметрам импульсов высоковольтного преобразователя. Скорость распространения стримера обычно на порядок больше, чем скорость распространения лавины. Можно приблизительно считать, что время формирования стримерного разряда t_p [5] имеет вид

$$t_p \approx \frac{\ln N_3}{\alpha_{эф} \cdot v_3} = \frac{\ln(10^8)}{40 \cdot 10^7} = 46 \cdot 10^{-9} \text{ с}, \quad (12)$$

где $\alpha_{эф}$ – коэффициент ударной ионизации с учетом эффекта прилипания ($\alpha_{эф}(E = 20 \text{ кВ/см}) = 40$); v_3 – скорость дрейфа электронов, $v_3 = \mu_3 E$; E – напряженность электрического поля на разрядном промежутке, см/В (для разрядного промежутка $d = 2,45$ см и напряжения $U = 50$ кВ, $E_{cp} = 20$ кВ/см); μ_3 – подвижность электронов, см/(В·с) [для напряженности электрического поля $E = 20$ кВ/см, $\mu_3 = 500$ см²/(В·с)].

Зная время формирования разряда, можно определить длительность формируемого импульса с учетом времени нарастания и спада напряжения:

$$t_u = t_{нар} + t_p + t_{сп} \approx 4t_p = (3 \div 4) \cdot 46 \cdot 10^{-9} = (138 \div 184) \cdot 10^{-9} \approx 140 \dots 190 \text{ нс}. \quad (13)$$

Таким образом, для реализации технологической установки с использованием стримерного разряда необходимо создавать формирователи высоковольтных импульсов со следующими параметрами: среднее значение напряженности поля в разрядном промежутке должно составлять 20 кВ/см, длительность воздействия, формируемого импульса высокого напряжения, 140...190 нс.

Результаты экспериментальных исследований. Для проведения экспериментов по очистке отходящих газов металлургических предприятий от диоксида серы создан макет высоковольтного преобразователя. В его состав входят блок первичных коммутаторов на транзисто-

рах IGBT, высоковольтный импульсный трансформатор, блок формирования выходного импульса на базе высоковольтных диодов с SOS-эффектом.

В лабораторных условиях была исследована эффективность преобразования диоксида серы при различных напряженностях электрического поля, которое создается высоковольтным преобразователем (источником стримерного разряда) [4]. Для обработки газа стримерным разрядом использовался серосодержащий газ с начальной концентрацией диоксида серы в газе: $0,579 \text{ г/м}^3$; $0,95 \text{ г/м}^3$; $2,13 \text{ г/м}^3$. Величина амплитуды импульса напряжения высоковольтного преобразователя определяется геометрическими параметрами ионизационной камеры, однако, поскольку физическое воздействие на газ оказывает уровень напряженности электрического поля, полученные результаты, характеризующие степень преобразования диоксида серы, представлены в зависимости от напряженности электрического поля в разрядном промежутке (рис. 1).

В ходе эксперимента напряженность электрического поля изменялась от 0 до 23 кВ/см. Из рис. 1 видно, что при повышении напряженности до 23 кВ/см, наблюдается рост степени обезвреживания диоксида серы, которая достигает 96 %.

Производные зависимостей рис. 1 характеризуют интенсивность изменения степени преобразования диоксида серы на разных участках изменения напряженности поля (рис. 2). Можно определить участок резкого роста степени преобразования диоксида серы и точку наступления максимума степени преобразования.

Из рис. 2 видно, что в диапазоне напряженности 16,94...21,56 кВ/см наблюдается увеличение интенсивности роста степени преобразования диоксида серы. При напряженности поля более чем 21,56 кВ/см происходит уменьшение интенсивности роста степени преобразования диоксида серы, и при напряженности поля 23 кВ/см степень преобразования достигает некоторого насыщения. Таким образом, последующее увеличение напряженности электрического поля приведет к неоправданным энергозатратам.

Выводы. 1. Выявлено, что применение стримерного разряда для очистки отходящих газов от диоксида серы является более предпочтительным по сравнению с коронным разрядом вследствие того, что стримерный разряд охватывает весь объем разрядной камеры и в стримерном разряде электрон обладает более высокой энергией, а следовательно, более высокой ионизирующей способностью для ионизации молекул и атомов обрабатываемого разрядом газа.

2. Определены основные требования к параметрам выходных импульсов высоковольтного преобразователя для создания стримерного разряда и осуществления процесса удаления диоксида серы из отходящих газов: среднее значение напряженности поля в разрядном промежутке 20 кВ/см; длительность выходного импульса высокого напряжения 140...190 нс.

3. Результаты экспериментальных исследований подтвердили теоретически полученные значения параметров выходных импульсов высоковольтного преобразователя. Так, при

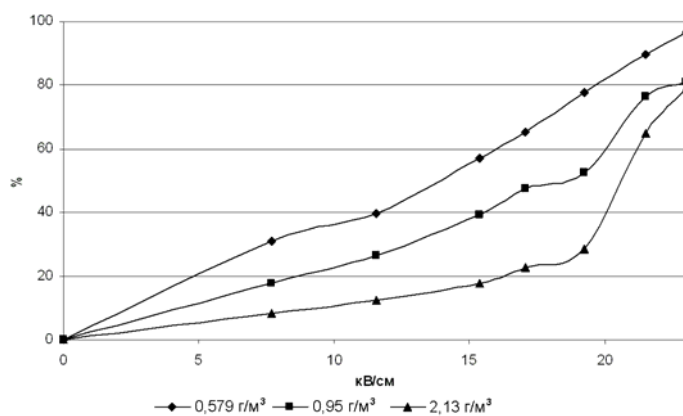


Рис. 1

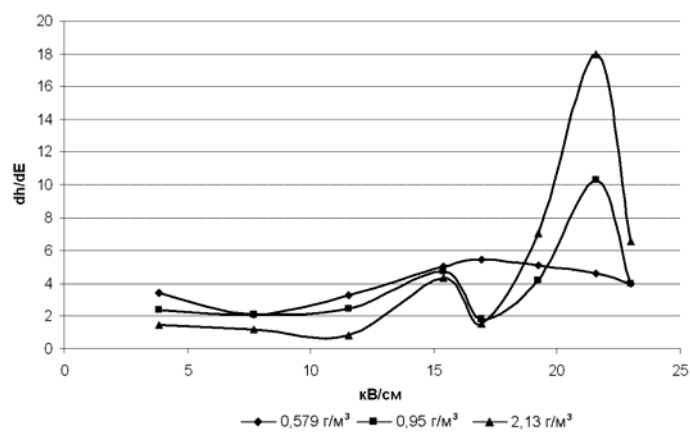


Рис. 2

повищенні напруженості до 23 кВ/см спостерігався ріст ступеня обезвредження діоксида сери до 96 %, що також свідчить про ефективність застосування стримерного розряду для очищення відходів газів від діоксида сери.

1. *Важов В.Ф., Лавринович В.А., Лопаткин С.А.* Техника высоких напряжений. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 119 с.
2. *Волков И.В., Гапченко Л.М.* Магнитно-тиристорный генератор наносекундных импульсов для возбуждения лазеров на парах меди “KULON”LT-1,5 CU // Техн. електродинаміка. – 2004. – № 3. – С. 23–27.
3. *Воскобойников В.Г., Кудрин В.А., Якушев А.М.* Общая металлургия: Учеб. для вузов. – 6 изд. перераб. и доп. – М.: ИКЦ Академкнига, 2005. – 768 с.
4. *Литвиненко Т.М., Манідіна Є.А., Смотраєв Р.В., Будагова А.А.* Вплив оброблення сірковмісного газу стримерним розрядом на окиснення діоксиду сірки // Вопросы химии и химической технологии. – 2012. – № 2. – С. 153.
5. *Месяц Г.А.* Импульсная энергетика. – М.: Наука, 2004. – 704 с.
6. *Поляков Н.П.* Наносекундные озонаторы // Приборы и техника эксперимента. – 2004. – № 5. – С. 126–129.
7. *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда: Учеб. руководство. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1992. – 536 с.
8. *Швидкий М.І.* Наукові основи, способи і системи комплексного очищення пилогазових викидів промислових підприємств: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. – Кривий Ріг, 1997. – 38 с.
9. *Sokovin S.Yu., Kotov Yu.A., Mesyats G.A.* // Proc. Of XI Intern. Conf. on High-Power Particle Beams. Prague, Czech Republic, June 10-14, 1996. – V. 2. – P. 828.

УДК 621.314:621.373

А.В. Переверзєв¹, докт. техн. наук, **Т.М. Литвиненко²**, асист.

1 – Запорізький інститут економіки та інформаційних технологій,
вул. Кияшка, 16 Б, 69015, Запоріжжя, Україна

2 – Запорізька державна інженерна академія,
пр. Леніна, 226, 69006, Запоріжжя, Україна

Оцінка електрофізичних параметрів розрядів для електроустановок нейтралізації діоксида сірки

Наведено результати порівняння електрофізичних параметрів коронного і стримерного розрядів. Показано, що застосування стримерного розряду для очищення газів від діоксида сірки є більш доцільним. Сформульовано вимоги до електричних параметрів імпульсів високовольтного перетворювача для більш ефективної дії електричним розрядом на діоксид сірки. Наведено результати експериментальних досліджень, що підтверджують ефективність застосування стримерного розряду для знешкодження діоксида сірки. Ступінь знешкодження досягає до 96 %. Бібл. 9, рис. 2, таблиця.

Ключові слова: електротехнологія, електричний розряд, видалення діоксида сірки, імпульс високої напруги.

A.V. Pereverzev¹, **T.M. Lytvynenko²**

1 – Zaporizhzhya Institute of Economics and Information Technologies,
Kiyashko St., 16b, 69015, Zaporizhzhya, Ukraine

2 – Zaporizhzhya state engineering academy,
pr. Lenina, 226, 69006, Zaporizhzhya, Ukraine

Estimation of electro-physical parameters of electric discharge for electro-technological device of neutralization of sulfur dioxide

The results of comparison of electrophysical parameters of corona and streamer discharges are proposed. It is shown that application streamer discharge for cleaning of gases from sulfur dioxide is more appropriate. Requirements for electrical parameters of the pulse high-voltage transducers for the electrical discharge of sulfur dioxide are described. The results of experimental research confirming the effectiveness of streamer discharge for neutralization of sulfur dioxide are proposed. The degree of neutralization reaches up to 96 %. References 9, figures 2, table.

Key words: electrotechnology, electric discharge, disposal of sulfur dioxide, high-voltage impulse.

Надійшла 4.03.2015

Received 4.03.2015