

# ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИМПУЛЬСНОГО КОРОННОГО РАЗРЯДА В УГЛЕКИСЛОМ ГАЗЕ И ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТАКОГО РАЗРЯДА ДЛЯ РАЗЛОЖЕНИЯ $CO_2$

Г.П. Березина, В.И. Мирный, О.Л. Омелаенко, В.С. Ус

Национальный Научный Центр "Харьковский физико-технический институт"

Харков, Украина,

E-mail: v\_mirny@kipt.kharkov.ua

На лабораторном макете плазмохимического реактора исследована возможность диссоциации  $CO_2$  с целью получения  $CO$  в высоковольтном импульсном коронном разряде при напряжении до 120 кВ, длительности импульса тока  $\approx 0,5$  мкс, частоте повторения до 100 Гц. Изучены особенности вольт-амперных характеристик такого разряда при различных давлениях воздуха и углекислого газа в разрядной камере и конструкции внутреннего электрода. Установлено, что в условиях проведенных экспериментов максимальная эффективность наработки  $CO$  не превышает 3,5%.

PACS: 52.80.Nc

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на достигнутые успехи в изучении физических процессов, происходящих в электрических разрядах различного типа, по-прежнему актуальными остаются исследования возможности их применения в неравновесной плазмохимии, в частности, для разложения двуокиси углерода ( $CO_2$ ) с целью получения монооксида углерода ( $CO$ ), которая находит широкое применение в химической промышленности и является важным компонентом водородной энергетики [1].

В проведенных ранее авторами экспериментах по диссоциации  $CO_2$  при атмосферном давлении под действием многоискрового электрического разряда, осуществляемого между набором остриев и плоскостью была достигнута эффективность разложения  $CO_2$ ,  $\sim 30\%$  (наработка  $CO \sim 24\%$ ) при затратах энергии несколько десятков электронвольт на молекулу [2]. В настоящее время продолжается поиск и исследования других типов электрических разрядов, более эффективных для плазмохимических методов получения монооксида углерода.

Одним из видов электрических разрядов, используемых для создания неравновесной плазмы, является высоковольтный (50...150 кВ) импульсный коронный разряд. Исследования возможности его использования для диссоциации углекислого газа стимулированы результатами, достигнутыми при разложении вредных добавок ( $NO_x$ ,  $SO_x$ ) в дымовых и выхлопных газах в таких разрядах [3]. Достигнутая эффективность разложения примесей газов в зависимости от конкретных условий составляла 50...80%. Эти результаты позволяли надеяться, что импульсный коронный разряд окажется эффективным и для диссоциации  $CO_2$  с целью получения  $CO$ .

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для проведения экспериментов по диссоциации углекислого газа создана экспериментальная установка, включающая: плазмохимический реактор; импульсный высоковольтный источник питания напряжением до 150 кВ, длительностью импульса тока 0,5...1 мкс, частотой повторения до 100 Гц; си-

стему предварительной откачки и напуска рабочего газа; измерительно-диагностический комплекс.

Реактор представляет собой цилиндрическую трубу из нержавеющей стали длиной 1300 мм с внутренним диаметром 115 мм, по оси которой между двумя изоляторами устанавливался внутренний электрод различной формы и размера.

Блок-схема экспериментальной установки с системой электропитания и диагностической аппаратурой приведена на Рис. 1.

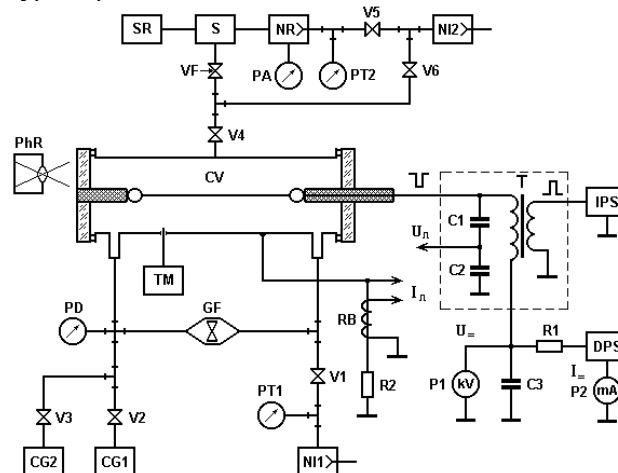


Рис. 1. Схема экспериментальной установки с системой электропитания и диагностики

На схеме:  $CV$  – камера реактора,  $CG1$ ,  $CG2$  – баллоны с рабочим газом,  $N1$ ,  $N2$  – форвакуумные насосы,  $NR$  – вакуумный турбомолекулярный насос,  $S$  – масс-анализатор,  $SR$  – самописец,  $PD$  и  $PA$  – вакуумметры деформационного и ионизационного типа,  $PT1$ ,  $PT2$  – термопарные вакуумметры,  $V1$  –  $V6$  – вентили,  $VF$  – натекатель,  $GF$  – вентилятор,  $TM$  – блок измерителя температуры,  $DPS$  – источник постоянного напряжения,  $C3$  – блокировочный конденсатор,  $R1$  – ограничительный резистор,  $P1$ ,  $P2$  – киловольтметр и миллиамперметр,  $IPS$  источник импульсного напряжения,  $T$  – высоковольтный повышающий трансформатор,  $C1$  –  $C2$  – емкостной делитель,  $RB$  – пояс Роговского,  $R2$  – измерительный резистор,  $PhR$  – фотоприемник.

### 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИМПУЛЬСНОГО ВЫСОКОВОЛЬТНОГО КОРОННОГО РАЗРЯДА В ВОЗДУХЕ И УГЛЕКИСЛОМ ГАЗЕ

Для предварительных исследований вольт-амперных характеристик в качестве рабочего газа использовался воздух при давлении 0,5...1 атм.

С целью определения влияния размеров и формы внутреннего электрода на электрические характеристики коронных разрядов в качестве электрода использовались: проволока диаметром 0,2...2 мм и стержни диаметром 4...6 мм (гладкие и с резьбой) из нержавеющей стали длиной 750 мм, а также конструкция, состоящая из набора звездочек (тонких шайб с острями по периметру), нанизанных на стержень. Количество звездочек, расстояния между ними, их диаметр и количество острий варьировалось.

Исследования показали, что диаметр и форма внутреннего электрода слабо влияют на вольт-амперные характеристики коронного разряда в воздухе. В дальнейших экспериментах использовался стержень диаметром 4 мм с резьбой.

Как показали результаты проведенных экспериментов, вольт-амперные характеристики практически линейные и в интервале давлений 0,5...1,0 атм. слабо зависят от давления воздуха в камере реактора. Это связано с тем, что в этом случае регистрируемый ток в основном определяется емкостным током, а не током разряда. Максимальное пробивное напряжение ( $\leq 120$  кВ), при котором коронный разряд переходит в искровой, наблюдалось при атмосферном давлении. С уменьшением давления пробивное напряжение снижалось до 75 кВ при давлении 0,5 атм.

В экспериментах по исследованию коронного разряда в углекислом газе в качестве внутреннего электрода использовался стержень из нержавеющей стали диаметром 4 мм с резьбой, и конструкция, состоящая из набора звездочек из нержавеющей стали толщиной 0,3 мм и наружным диаметром 40 мм, нанизанных на стержень диаметром 6 мм и длиной 750 мм. Каждая звездочка имела по 15 острий, шириной 1 мм и высотой 7 мм, расположенных равномерно по ее периметру. Расстояние между звездочками составляло 7 мм. Измерения проводились при давлении  $CO_2 \approx 1$  атм.

Как показали исследования, характеристики импульсного коронного разряда в  $CO_2$  существенно отличаются от полученных ранее для воздуха. Если в воздушной среде во всем диапазоне напряжений существования коронного разряда свечение наблюдалось только вблизи центрального электрода и при достижении предельного напряжения коронный разряд переходил в искровой, то в среде углекислого газа с ростом напряжения разряд переходил в режим, характеризующийся резким увеличением тока, при стабилизации напряжения на определенном уровне. В этом случае свечение, состоящее из ярких нитей (стримеров), наблюдалось во всем объеме разрядной камеры.

На Рис.2 приведены вольт-амперные характери-

стики импульсного коронного разряда для трех различных давлений  $CO_2$  в разрядной камере с внутренним электродом в виде стержня из нержавеющей стали диаметром 4 мм с резьбой. Пунктирной линией показана зависимость емкостной составляющей тока от приложенного напряжения.

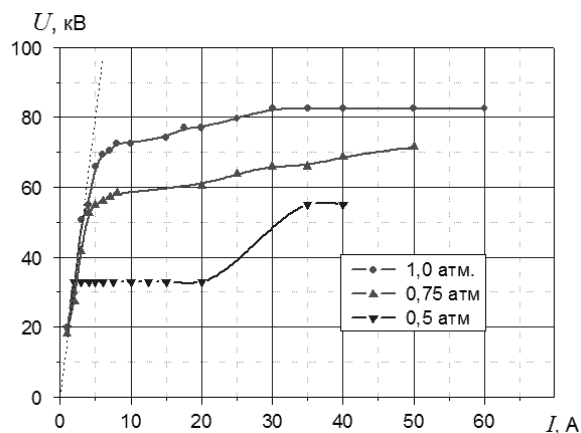


Рис.2. Вольт-амперные характеристики импульсно-коронного разряда для различных давлений  $CO_2$

Видно, что при напряжениях до 35...65 кВ (в зависимости от давления газа) зависимость регистрируемого тока от напряжения практически линейная, что свидетельствует об отсутствии тока коронного разряда. Начиная с некоторого порогового напряжения ( $U_{пор}$ ) наблюдается стабилизация напряжения при резком увеличении тока, и переход разряда в стадию стримерной короны. С ростом давления углекислого газа пороговое напряжение увеличивается. Как видно из приведенных вольт-амперных характеристик, разряд при низком давлении (0,5 атм.) имеет два режима стабилизации напряжения — при токах до 20 А и свыше 35 А. При больших давлениях этот эффект не проявляется.

При достижении некоторого критического тока ( $I_{кр}$ ), зависящего от давления  $CO_2$  в разрядной камере, разряд переходит в искровой. Поскольку максимальные значения тока и напряжения коронного разряда достигнуты при атмосферном давлении  $CO_2$ , поэтому дальнейшие эксперименты проводились при этом давлении.

На Рис.3 приведены осциллограммы напряжения (а) и тока (б) импульсного коронного разряда в углекислом газе при атмосферном давлении в режиме, соответствующем началу стримерной короны. На осциллограммах масштаб развертки — 500 нс/дел.

Видно, что длительность импульса тока ( $\approx 450$  нс на уровне 0,5 амплитуды) существенно меньше длительности импульса приложенного напряжения. Время нарастания тока составляет  $\approx 300$  нс, а напряжения  $\approx 400$  нс.

При разряде в воздухе импульс тока разряда достигал своего максимального значения примерно на 250 нс ранее, чем импульс напряжения, что свидетельствует о емкостном характере суммарного тока. При разряде в среде  $CO_2$  максимумы импульсов тока и напряжения практически совпадают. Это является подтверждением того, что в данном случае ток ко-

ронного разряда является преобладающим в регистрируемом суммарном токе.

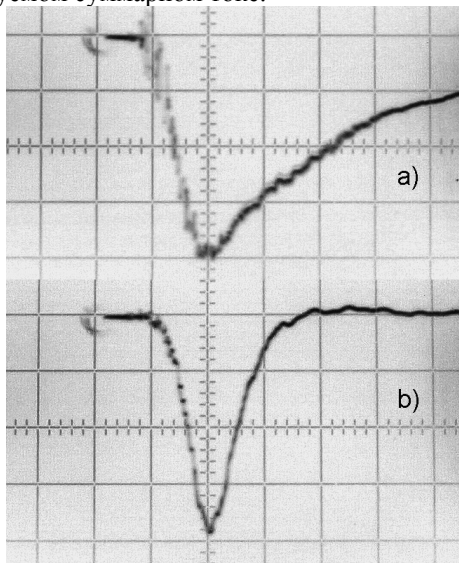


Рис.3. Осциллограммы напряжения (а) и тока (б) импульсного коронного разряда в углекислом газе

На Рис.4 приведены зависимости напряжения от тока разряда для трех конфигураций внутреннего электрода: кривая (1) – для стержня из нержавеющей стали диаметром 4 мм с резьбой; кривая (2) – для стержня с 10 звездочками; кривая (3) – для стержня с 76 звездочками.

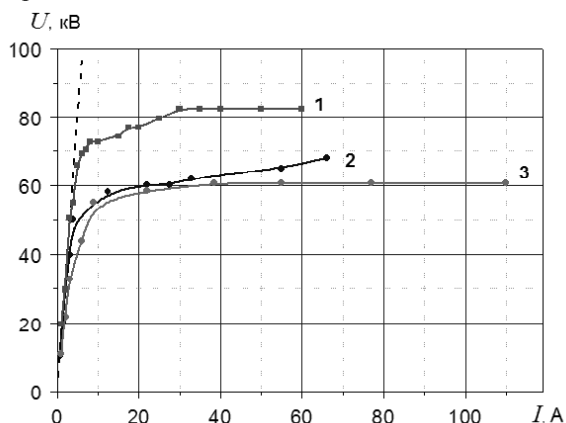


Рис.4. Вольт-амперные характеристики импульсного коронного разряда для трех различных конфигураций внутреннего электрода

Пунктирной линией показана зависимость емкостной составляющей тока от приложенного напряжения.

Как видно из приведенных графиков, до напряжений 35...40 кВ в регистрируемом токе преобладает емкостная составляющая. С повышением напряжения наблюдается его стабилизация при резком увеличении тока, и переход разряда в стадию стримерной короны. При токе больше критического, зависящего от конфигурации внутреннего электрода, разряд переходит в искровой.

#### 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ СО ПРИ ДИССОЦИАЦИИ $CO_2$ В ИМПУЛЬСНОМ ВЫСОКОВОЛЬТНОМ КОРОННОМ РАЗРЯДЕ

Перед воздействием разряда на углекислый газ регистрировался его контрольный масс-спектр. Затем через определенные промежутки времени после начала действия разряда снимались повторные масс-спектры рабочего газа.

Обработка полученных масс-спектров осуществлялась двумя путями: нормированием величин всех основных компонентов спектра по величине спектральной составляющей калибровочного газа (аргона) и по сумме величин всех спектральных компонентов с учетом коэффициентов ионизации. Сравнение величин спектральных составляющих отдельных газовых компонентов с соответствующими значениями в контрольном спектре позволяет определить их процентное содержание в зависимости от продолжительности действия разряда.

Для проведения экспериментов по воздействию импульсного коронного разряда на  $CO_2$  в качестве внутреннего электрода использовался стержень диаметром 6 мм с наназанными на него звездочками. На Рис.5 показаны зависимости прироста содержания  $CO$  в разрядной камере от времени действия разряда для трех конфигураций внутреннего электрода: кривая (1) – для стержня с 10 звездочками; кривая (2) – с 20 звездочками и кривая (3) – с 76 звездочками.

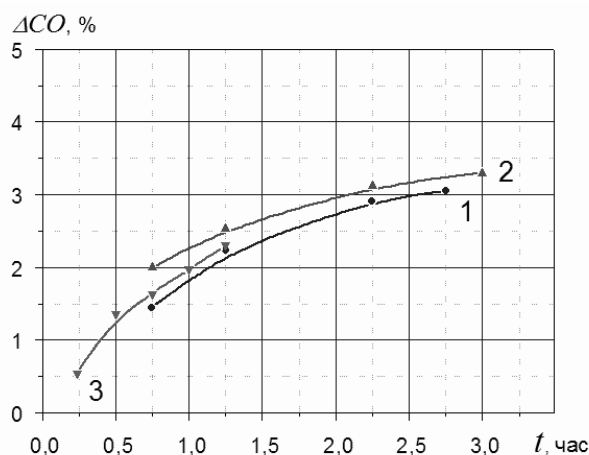


Рис.5. Зависимость прироста содержания  $CO$  в рабочем газе от времени действия импульсного коронного разряда

Для всех трех случаев режим работы был примерно один и тот же: напряжение – 60...65 кВ, ток  $\approx 60$  А при частоте повторения импульсов 50 Гц. При этом средняя мощность в коронном разряде составляла  $\approx 100$  Вт. Видно, что скорость роста содержания окиси углерода в рабочем газе после 1,5-2 часов действия разряда снижается, а максимальный прирост составляет  $\approx 3,5\%$ .

Характерно также, что кривые, полученные для различного числа звездочек, в условиях проведенных экспериментов практически совпадают, что свидетельствует о слабой зависимости наработки  $CO$  от формы внутреннего электрода.

Для сравнения были проведены эксперименты со стационарным коронным разрядом. Результаты экспериментов по разложению  $CO_2$  в таком разряде при

напряжении отрицательной полярности 50 кВ и токе 2 мА приведены на Рис.6.

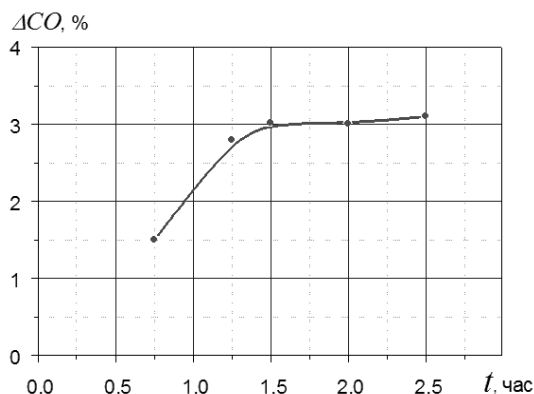


Рис.6. Зависимость прироста содержания  $CO$  в рабочем газе от времени действия стационарного коронного разряда

Видно, что в течение  $\approx 1,5$  часа содержание окиси углерода в разрядной камере увеличивается до величины  $\approx 3\%$  и в дальнейшем остается практически постоянным, то есть наступает динамическое равновесие.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что харак-

теристики высоковольтного импульсного коронного разряда в  $CO_2$  существенно отличаются от характеристик такого разряда в воздухе.

Показана возможность диссоциации  $CO_2$  и получения  $CO$  в высоковольтных стационарном и импульсном коронных разрядах. Установлено, что в условиях проведенных экспериментов максимальная эффективность наработки  $CO$  не превышает  $3,5\%$  и практически не зависит от вида разряда (стационарная или импульсная корона) и формы внутреннего электрода разрядной камеры.

Сравнение с результатами экспериментов, проведенных авторами ранее [2], показали, что высоковольтный коронный разряд малоэффективен для осуществления реакции диссоциации  $CO_2$  и наработки  $CO$  по сравнению с многоискровым разрядом.

## ЛИТЕРАТУРА

1. В.А. Легасов. Водородная энергетика // *Природа*, 1974, №3, с.3.
2. Г.П. Березина, И.Н. Онищенко, В.С. Ус, Импульсная плазмохимия  $CO_x$ ,  $NO_x$ ,  $SO_x$  // *Прикладная физика*, 2002, вып.2, с.34-44.
3. G. Dinelli et al. Industrial Experiments on Pulse Corona Simultaneous Removal of  $NO_x$  and  $SO_x$  from Flue Gas // *IEEE Transactions on Industry Applications*, May-June 1990, v.26, №23.

## INVESTIGATION OF PECULIARITIES OF A HIGH-VOLTAGE PULSING CORONA DISCHARGE IN CARBONIC GAS AND AN FEATURE USING OF SUCH DISCHARGE FOR $CO_2$ DISSOCIATION

G.P. Berezina, V.I. Mirny, O.L. Omelaenko, V.S. Us

On laboratory stand of plasmochemical reactor the feature of  $CO_2$  dissociation with the purpose of  $CO$  production in high-voltage pulsing corona discharge is investigated at a voltage up to 120 kV, a pulse length of a current  $0,5 \mu s$  a repetition rate up to 100 Hz. Peculiarities of volt-ampere characteristics of such discharge are studied at different pressures of air and carbonic gas in the discharge chamber and a construction of an interior electrode. It is established, that in conditions of the carried out experiments a maximum efficiency of  $CO$  accretion does not exceed  $3,5\%$ .

## ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ІМПУЛЬСНОГО КОРОННОГО РОЗРЯДУ В ВУГЛЕКИСЛОМУ ГАЗІ ТА МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ТАКОГО РОЗРЯДУ ДЛЯ РОЗКЛАДАННЯ $CO_2$

Г.П. Березина, В.І. Мирний, О.Л. Омеленко, В.С. Ус

На лабораторному макеті плазмохімічного реактора досліджена можливість дисоціації  $CO_2$  з метою одержання  $CO$  у високовольтному імпульсному коронному розряді при напрузі до 120 кВ, тривалості імпульсу струму  $\approx 0,5$  мкс, частоті повторень до 100 Гц. Вивчені особливості вольт-амперних характеристик такого розряду при різних тисках повітря і вуглекислого газу у розрядній камері та конструкції внутрішнього електроду. Встановлено, що в умовах проведених експериментів максимальна ефективність наробітку  $CO$  не перевищує  $3,5\%$ .