

УДК 533.9.07  
EDN: HLBHLU

PACS: 52.75.Hn



## Характеристики мощного плазмотрона переменного тока при работе на углекислом газе

С. Г. Ребров, А. Н. Голиков, И. А. Федоров

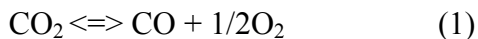
*Представлены результаты исследования особенностей работы трехфазного плазмотрона переменного тока мегаваттной мощности при использовании в качестве рабочего тела углекислого газа. Получены данные по вольтамперной характеристике плазмотрона, а также по скорости уноса наиболее теплонапряженных узлов: электродов и конфузоров. Данные по уносу получены путем взвешивания исследуемых узлов после циклов их работы. Режимы работы плазмотрона варьировались в диапазоне: дуговая мощность: 0,92–1,2 МВт, ток: 345–400 А, расход углекислого газа ~110 г/с. Проведено сравнение скорости уноса электродов и конфузоров при работе плазмотрона на CO<sub>2</sub> и воздухе.*

*Ключевые слова:* плазмотрон переменного тока, трехфазный плазмотрон, электрическая дуга, ресурс, электроды, эрозия, реформинг.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-2-103-108

### Введение

Использование углекислого газа в качестве рабочего тела плазмотронов имеет несколько прикладных применений. В частности, в настоящее время стоит проблема утилизации CO<sub>2</sub> как основного парникового газа. Используемые в настоящее время методы его захоронения путем закачки в нефтяные и геологические образования имеют ограниченное применение и не позволят полностью решить проблему. Одним из путей решения проблемы является метод прямого разложения CO<sub>2</sub> в соответствии с уравнениями:



Ребров Сергей Григорьевич, д.т.н.  
E-mail: rebrov\_sergey@mail.ru  
Голиков Андрей Николаевич, д.т.н.  
Федоров Иван Алексеевич, вед. инженер.  
АО ГНЦ «Центр Келдыша».  
Россия, 125438, Москва, ул. Онежская, 8.

Статья поступила в редакцию 1.12.2022  
Принята к публикации 21.01.2023

© Ребров С. Г., Голиков А. Н., Федоров И. А., 2023



На рис. 1 приведены данные расчета равновесного состава при нагреве CO<sub>2</sub> в мольных долях до температур, характерных для среднемаховой температуры на выходе из плазмотрона. Расчет проводился с использованием программы для моделирования фазовых и химических равновесий «ТЕРРА» [1].

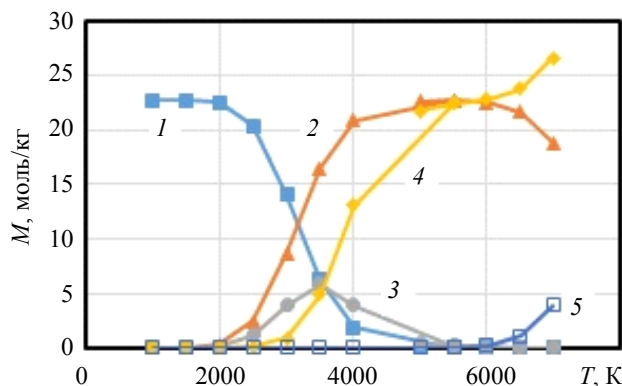


Рис. 1. Состав продуктов пиролиза углекислого газа в зависимости от температуры в камере плазмотрона. Кривые 1 – CO<sub>2</sub>; кр. 2 – CO; кр. 3 – O<sub>2</sub>; кр. 4 – O; кр. 5 – C

Как видно, конверсия CO<sub>2</sub> начинается при температуре выше 2000 К, а при темпера-

туре 4000 К содержание  $\text{CO}_2$  снижается до 1,8 моль/кг (до 8 % по весу). Процесс по уравнению (2) начинается при температурах  $> 6000$  К. Так как непосредственно в дуге температура достигает величин до 10000 К, то частично в продуктах истечения может присутствовать углерод.

К настоящему времени выполнено достаточно много исследований по прямому преобразованию углекислого газа с помощью таких методов, как плазма тлеющего разряда [2], коронный разряд [3], плазма СВЧ-разряда и стримерного импульсно-частотного разряда [4], плазма дугового разряда [5, 6] со струей, вытекающей в среду с пониженным давлением. В [3] показано, что использование плазмотрона [5, 6] позволяет обеспечить достаточно высокую энергоэффективность процесса разложения  $\text{CO}_2$ . Однако, технология, описанная в [5, 6], имеет ряд недостатков. Так, используется плазмотрон постоянного тока с вольфрамовым катодом. Для его защиты в качестве рабочего газа используется аргон, к которому подмешивается  $\text{CO}_2$ . Таким образом, провести исследования непосредственно с чистым  $\text{CO}_2$  авторы [5, 6] не могли, при этом максимальная объемная доля  $\text{CO}_2$  достигала 27 %. Данных измерений температуры авторы [5, 6] не приводят, но судя по приведенной технологической схеме рециклинга с встраиванием плазмотрона, она достигает 3500 К. Электрическая мощность плазмотрона не превышала 30 кВт, что не позволяет масштабировать технологию в промышленных масштабах.

Известно, что конверсия метана в смеси с углекислым газом рассматривается многими исследователями как альтернативный способ утилизации  $\text{CO}_2$  для снижения парникового эффекта и одновременно синтеза полезных продуктов. Плазмохимическая конверсия метана с использованием плазмотрона исследована в работе [7], где в качестве рабочего тела использовался аргон с газовой стабилизацией.

Одним из направлений утилизации  $\text{CO}_2$  является его использование для плазменной газификации тонкодисперсных водоугольных суспензий (ВУС). В работе [8] показано, что при использовании в качестве рабочего газа  $\text{CO}_2$  в мощном электродуговом плазмотроне «Звезда» и подаче в смесительную камеру

плазмотрона ВУС, уже при температуре  $\sim 1500$  К имеет место выход синтез-газа – как продукта плазменного пиролиза  $\text{CO}_2$  и ВУС.

Таким образом, целью настоящего исследования являлось исследование работы мощного электродугового плазмотрона переменного тока «Звезда» при использовании в качестве рабочего тела  $\text{CO}_2$ , подаваемого непосредственно в дуговые каналы, а также определение скоростей уноса материала наиболее теплонапряженных узлов плазмотрона – электродов и конфузоров.

### Условия проведения экспериментов и их анализ

Плазмтроны «Звезда» [9–12], вариант которого использовался в настоящей работе, могут использоваться как источники высокотемпературного газа в тех случаях, когда необходимо обеспечить возможность выбора в широких пределах параметров газового потока: его расхода, температуры и давления. Такая возможность имеет место вследствие того, что дуговая мощность плазмотрона, которая определяется токами и напряжениями дуговых разрядов, также может изменяться в широком диапазоне. Дуговые токи можно изменять переключением индуктивных балластных нагрузок (реакторов), которые включаются последовательно с дуговыми разрядами. Напряжения на дуговых разрядах, которые уменьшаются при росте дуговых токов, могут быть значительно увеличены при росте расхода и давления газа в плазмтроне. Давление газа в камере плазмотрона, которое зависит от дуговой мощности, расхода газа и диаметра выходного сопла также может выбираться в широком диапазоне – от единиц до примерно сотни атмосфер. Температура газа в камере плазмотрона может изменяться в диапазоне от 2500 до 5000 К, а при использовании на выходе плазмотрона газовых смесителей, которые используются для точной регулировки температуры, этот диапазон может быть расширен в сторону меньших температур с одновременным увеличением расхода газа (до нескольких кг/с). В качестве рабочих тел могут использоваться воздух, а также азот и ряд других газов, в том числе инертные (аргон, гелий), а также углеродсодержащие газы, включая  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ .

Схема электрических подключений плазмотрона приведена в работе [8]. На рис. 2 приведена схема подачи рабочего газа. Углекислый газ подается непосредственно в дуговые каналы электродов через завихрители-изоляторы. Нагреваемый в дугах газ попадает в камеру, в которой происходит дополнительный нагрев газа за счет выходящих в камеру замыкающихся в нулевой точке дуг, и вытекает из сопла. В камере имеется штуцер подачи дополнительного рабочего тела. В этом случае камера играет роль плазмохимического реактора. Опыт использования плазмотрона в такой конфигурации приведен в работе [8], в которой описаны результаты плазменной газификации водоугольных суспензий – путем подачи ВУС непосредственно в камеру плазмотрона.

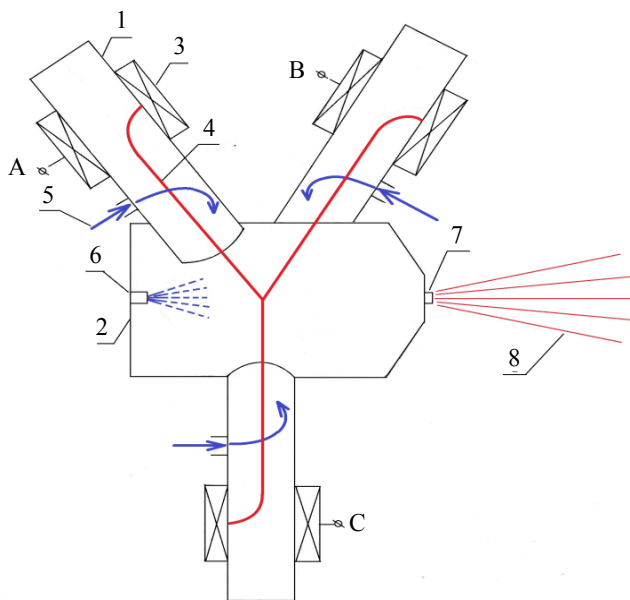


Рис. 2. Схема плазмотрона «Звезда». 1 – электрод; 2 – камера; 3 – магнитные катушки; 4 – дуга; 5 – подача  $CO_2$ ; 6 – штуцер подачи дополнительного рабочего тела в камеру; 7 – выходное сопло; 8 – струя

Работа плазмотрона на  $CO_2$  имеет ряд особенностей. Так, вихревая стабилизация дуги приводит к необходимости подачи газа с сильной закруткой, для чего требуются большие перепады давления между входным газовым коллектором и дуговыми каналами.  $CO_2$  подается из баллонов, в которых он находится на линии насыщения при давлении 6–7 МПа. Давление во входном газовом коллекторе, которое определяет расход через плазмотрон (расход задавался на уровне 100 г/с), состав-

ляло около 2 МПа. Далее газ проходит в плазмотрон через дюзы завихрителей, после чего давление сильно падает: в работающем плазмотроне с выходным соплом диаметром 30 мм оно не превышает 0,25 МПа. Углекислый газ является хорошим хладагентом, и магистраль подачи, в которой есть перепад давления, захлаживается.

Расчеты показывают, что при адиабатном расширении углекислого газа с давления в коллекторе до давления в плазмотроне, его температура может понижаться до 120–140 К. При данной температуре  $CO_2$  может существовать только в твердом виде, т. е. в плазмотрон подается двухфазная смесь. Но после входных дюз процесс перестает быть адиабатическим, вследствие теплообмена со стенками дуговых каналов (мощность их охлаждения при указанном расходе  $CO_2$  составляет около 12 кВт)  $CO_2$  снова переходит в газовую фазу. В подтверждение на рис. 3 приведены температуры газа во входном коллекторе и на выходе плазмотрона, полученные при его холодной продувке: при давлении в плазмотроне в районе атмосферного, температура  $CO_2$  на выходе не опускается ниже  $-5\text{ }^\circ\text{C}$ . Чтобы повысить входную температуру  $CO_2$ , магистраль подачи в рабочих пусках подогревали, но это не устраняло конденсации газа внутри плазмотрона.

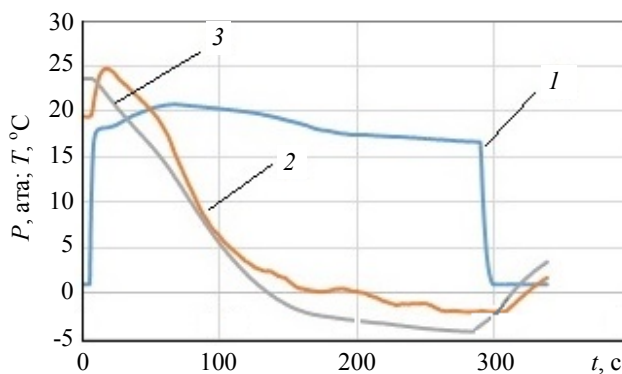


Рис. 3. Давление и температуры при продувке плазмотрона углекислым газом. 1 – давление на входе; 2 – температура на входе; 3 – температура на выходе

При проведении запусков в данной работе измерялась мощность, которая отводится в систему охлаждения. Это позволяло определять тепловой КПД плазмотрона. Оказалось, что КПД составляет 0,85–0,86, что несколько

больше, чем при работе на воздухе, для которого КПД составляет 0,75–0,8. Это может быть связано с рекуперацией тепла при охлаждении  $\text{CO}_2$  стенок плазмотрона, некотором снижении температуры в камере (по сравнению с воздухом), а также уменьшением тепловых потоков в стенки при возможном образовании на них углеродных покрытий.

Всего было проведено два цикла испытаний, которые отличались уровнем дуговых токов. После каждого цикла электроды плазмотрона взвешивались, и определялась скорость их уноса. В каждом цикле был выполнен запуск на стационарном режиме длительностью 300 секунд. Параметры этих пусков приведены в таблице 1, в которой обозначено:  $d_c$  – диаметр сопла,  $N_d$  – дуговая мощность,  $I$  – средний дуговой ток,  $U_d$  – среднее дуговое напряжение,  $G_{\text{CO}_2}$  – расход  $\text{CO}_2$ ,  $P_k$  – давление в камере,  $T_o$  – температура тор-можения в камере.

Работа плазмотрона на  $\text{CO}_2$  заметно отличается от работы на воздухе увеличением уровня пульсаций напряжений, токов дуговых разрядов, и, соответственно, дуговой мощности. Это может быть связано как с конденсацией рабочего тела при подаче в плазмотрон, так и с более низкими по сравнению с воздухом пробойными напряжениями плазмы углекислого газа, что приводит к увеличению частоты шунтирования дуги на стенки дугового канала. Для иллюстрации на рис. 4 приведены действующие значения дуговых напряжений в длительном запуске (на идентичных режимах) при работе на углекислом газе и воздухе. Также имеет место несимметрия дуговых напряжений по фазам при работе на  $\text{CO}_2$ , что может быть связано с двухфазными процессами в дуговых каналах при их несимметричном расположении в поле силы тяжести. Тем не менее, плазмотрон работает на  $\text{CO}_2$  устойчиво, без срывов дуги.

Таблица 1

№ цикла	$d_c$ , мм	$N_d$ , кВт	$I$ , А	$U_d$ , В	$G_{\text{CO}_2}$ , г/с	$P_k$ , МПа	$T_o$ , К
1	30	1157	401	970	108	0,243	3640
2	30	924	345	890	109	0,230	3260

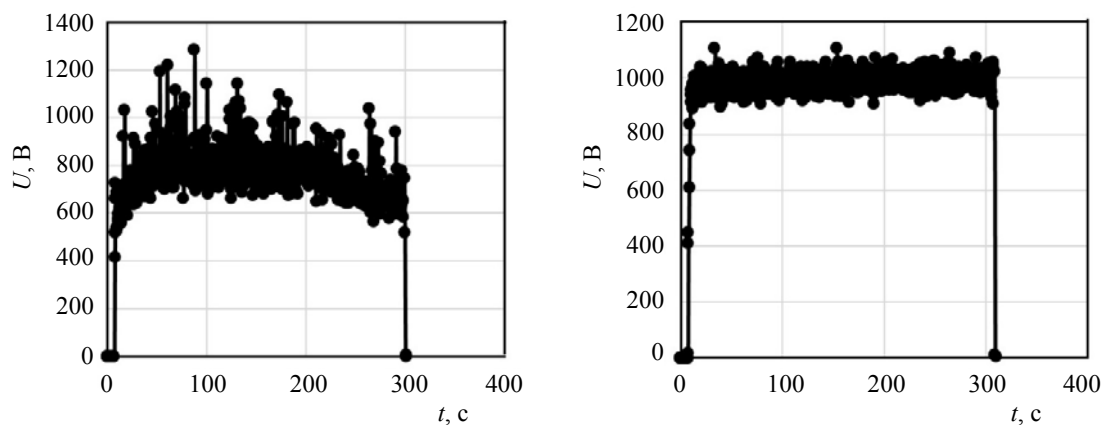


Рис. 4. Действующие значения дуговых напряжений  $U$  при работе плазмотрона на  $\text{CO}_2$  (слева) и воздухе (справа) в зависимости от времени  $t$

Методика измерения скорости эрозии была следующей. Перед включением измерялись геометрические размеры и масса всех электродов и конфузоров. Такие же измерения проводились после каждого пуска. Результатом измерений являлось определение скорости уноса массы материала элементов дугового канала и конфузора. Так как электроды и

конфузоры представляли собой сборные конструкции, то исследовался каждый элемент. Подробно методика проведения ресурсных испытаний плазмотрона при работе на воздухе и полученные результаты приведены в [13].

В таблице 2 представлены осредненные за два цикла и осредненные по трем электродам и конфузoram данные по удельной эрозии

электродов и конфузоров  $m_i = m/(I \times \tau)$ , где  $m_i$  – скорость эрозии (микрограммы на Кулон),  $I$  – фазный ток,  $\tau$  – время работы,  $m$  – скорость эрозии (микрограмм в секунду). В указанной таблице для сравнения приведены данные из [13] по удельной эрозии при работе плазмотрона на воздухе с мощностью 1 МВт.

Таблица 2

Вид рабочего тела	Электрод $m_i$ , мкг/Кл	Конфузор $m_i$ , мкг/Кл
CO <sub>2</sub>	0,9	6
Воздух	2	0,2

Как видно, удельная скорость эрозии электродов при использовании CO<sub>2</sub> более чем в два раза ниже, чем при работе на воздухе. В тоже время, обратная ситуация имеет место для конфузоров, для которых эрозия увеличилась по сравнению с воздухом. Связано это с тем, что газовихревая подача газа в электроды обеспечивает наличие пристеночной области течения CO<sub>2</sub> с температурой до 2000 К, при этом, как следует из рис. 1, при этих температурах разложение CO<sub>2</sub> достаточно мало. В то же время газ, истекающий через конфузоры в камеру, имеет значительно большую среднюю температуру, при которой образуется молекулярный и атомарный кислород, что значительно повышает окислительные свойства газовой среды и, как следствие, приводит к повышенной по сравнению с воздухом эрозии.

### Заключение

Проведено экспериментальное исследование особенностей работы мощного плазмотрона переменного тока «Звезда» на углекислом газе. Показано, что эффект дросселирования CO<sub>2</sub> в подводящей магистрали может приводить к пульсациям параметров вследствие двухфазности потока. Для снижения этого эффекта необходимо термостатиро-

вание магистрали подачи, в этом случае плазмотрон работает устойчиво без срывов дуги. Получены данные по скорости эрозии наиболее теплонапряженных узлов – электродов и конфузоров, проведено сравнение полученных данных с данными по эрозии для плазмотрона, работающего на воздухе. Полученные результаты позволяют рассматривать технологию использования мощного плазмотрона в качестве перспективной для решения проблемы утилизации CO<sub>2</sub>, а также в других плазмохимических процессах с участием CO<sub>2</sub>.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Трусков Б. Г. / Программная система TERRA для моделирования фазовых и химических равновесий: Труды XIV Межд. конф. по хим. термодинамике. – СПб., 2002.
2. Savinov S. Y., Lee H., Song H. K., Na B. K. / Ind. Eng. Chem. Res. 1999. № 38. P. 2540.
3. Wen Y., Jiang X. / Envir. Sci. Technol. 2001. № 21. P. 665.
4. Котелев М. С., Гуцин П. А., Иванов Е. В., Исаенков Ю. И., Нестеров Е. В., Винокуров В. А. / Башкирский химический журнал. 2010. Т. 17. № 3. С. 175.
5. Kobayashi A., Osaki K., Yamabe C. / Vacuum. 2002. № 65. P. 475.
6. Kobayashi A., Hamanaka H. / Vacuum. 2006. № 80. P. 1294.
7. Hrabrovsky M., Hlina M., Kopecky V., Maslani A. / Plasma Chem Plasma Process. <https://doi.org/10.1007/s11090-018-9891-5>.
8. Кошлаков В. В., Ребров С. Г., Голиков А. Н., Федоров И. А., Морозов А. Г., Ильюша А. В. / Тепловые процессы в технике. 2020. Т. 12. № 8. С. 374.
9. Коротеев А. С., Миронов В. М., Свирчук Ю. С. Плазмотроны: конструкции, характеристики, расчет. – М.: Машиностроение, 1993.
10. Svirchuk Y. S., Golikov A. N. / IEEE Transaction on Plasma Science. 2016. Vol. 44. № 12. P. 3042.
11. Голиков А. Н., Зайкин Н. С., Свирчук Ю. С. Патент РФ на изобретение № 2577332, 20.03.2016.
12. Голиков А. Н., Кочетков Ю. М., Полянский М. Н., Свирчук Ю. С. / Тепловые процессы в технике. 2009. Т. 1. № 9. С. 390.
13. Кошлаков В. В., Ребров С. Г., Голиков А. Н., Федоров И. А. / Прикладная физика. 2021. № 4. С. 31.

## Characteristics of a powerful AC plasma torch when operating on carbon dioxide

S. G. Rebrov, A. N. Golikov and I. A. Fedorov

The State Scientific Centre Keldysh Research Center  
8 Onegskayast., Moscow, 125438, Russia  
E-mail: rebrov\_sergey@mail.ru

Received 1.12.2022; accepted 21.01.2023

*The paper presents the results of a study of the features of the operation of a three-phase alternating current plasma torch of megawatt power when using carbon dioxide as a working medium. Data were obtained on the current-voltage characteristic of the plasma torch, as well as on the rate of entrainment of the most heat-stressed nodes: electrodes and confusers. The data on entrainment were obtained by weighing the studied nodes after their operation cycles. The operating modes of the plasma torch varied in the range: arc power: 0.92–1.2 MW, current: 345–400 A, carbon dioxide consumption ~110 g/s. The rate of entrainment of electrodes and confusers during operation of the plasma torch on CO<sub>2</sub> and air is compared.*

**Keywords:** AC plasma torch, three-phase plasma torch, electric arc, resource, electrodes, erosion, reforming.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-2-103-108

### REFERENCES

1. Trusov B. G., TERRA software system for modeling phase and chemical equilibria. Proceedings of the XIV International Conference on Chemical Thermodynamics. St. Petersburg, 2002.
2. Savinov S. Y., Lee H., Song H. K. and Na B. K., Ind. Eng. Chem. Res., № 38, 2540 (1999).
3. Wen Y. and Jiang X., Envir. Sci. Technol., № 21, 665 (2001).
4. Kotelev M. S., Gushchin P. A., Ivanov E. V., Isaenkov Yu. I., Nesterov E. V. and Vinokurov V. A., Bashkirskii khimicheskii zhurnal **17** (3), 175 (2010).
5. Kobayashi A., Osaki K. and Yamabe C., Vacuum, № 65, 475 (2002).
6. Kobayashi A. and Hamanaka H., Vacuum, № 80, 1294 (2006).
7. Hrabrovsky M., Hlina M., Kopecky V. and Maslani A., Plasma Chem Plasma Process. <https://doi.org/10.1007/s11090-018-9891-5>.
8. Koshlakov V. V., Rebrov S. G., Golikov A. N., Fedorov I. A., Morozov A. G. and Ilyusha A. V., Thermal processes in technology **12** (8), 374 (2020).
9. Koroteev A. S., Mironov V. M. and Svirchuk Yu. S., Plasma torches: designs, characteristics, calculation, Moscow, Mashinostroenie, 1993.
10. Svirchuk Y. S. and Golikov A. N., IEEE Transaction on Plasma Science **44** (12), 3042 (2016).
11. Golikov A. N., Zaikin N. S. and Svirchuk Yu. S. RF patent for invention № 2577332, 20.03.2016.
12. Golikov A. N., Kochetkov Yu. M., Polyansky M. N. and Svirchuk Yu. S., Thermal processes in technology **1** (9), 390 (2009).
13. Koshlakov V. V., Rebrov S. G., Golikov A. N. and Fedorov I. A., Applied Physics, № 4, 31 (2021) [in Russian].