

Особенности водородного электродугового плазмотрона переменного тока и его применения в экологических приложениях

© Ю.Д. Дудник, В.Е. Кузнецов, А.А. Сафронов, В.Н. Ширяев, О.Б. Васильева

Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: julia_dudnik-s@mail.ru

Поступило в Редакцию 2 мая 2024 г.

В окончательной редакции 18 октября 2024 г.

Принято к публикации 30 октября 2024 г.

Представлены результаты исследований водородного электродугового плазмотрона переменного тока с газовихревой стабилизацией дуги. Показаны особенности конструкции устройства, представлены результаты экспериментов, приведены характерные осциллограммы и вольт-расходные характеристики.

Ключевые слова: плазмотрон, переменный ток, водород, метан.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.24.59438.6514k

Одной из ключевых задач науки является защита окружающей среды, и это требует самых современных методов и технологий. Приоритетным направлением представляется сокращение выбросов в атмосферу вредных веществ, состав которых весьма разнообразен: двуокись углерода, хлорфторуглероды, ядовитые и канцерогенные газы, окислы азота (NO_x), окислы серы (SO_x), оксиды металлов, зола, сажа, твердые частицы различного размера, химического состава и морфологии. Чаще всего данные вещества появляются в атмосфере как продукт процессов сгорания. Следовательно, необходимо внедрение на производственных предприятиях экологически чистых технологических процессов и малоотходных технологий замкнутого цикла, учитывающих тип и свойства выбросов, принципы их образования.

Применение водородных плазмохимических технологий, в частности, в сфере энергетики и добычи природных ископаемых может быть одним из вариантов увеличения эффективности производства и сокращения количества отходов [1,2]. Водород является одним из распространенных рабочих тел, используемых непосредственно в плазмохимических реакциях в качестве реакционного газа или высокоэнтальпийного теплоносителя.

В таблице представлены краткие результаты развития водородных плазмотронов на протяжении нескольких десятков лет [3–6]. Анализируя источники, можно выделить характерные особенности конструкций: плазмтроны линейной или торцевой схемы с вихревым продольным обдувом, пористой стенкой, межэлектродной вставкой. Даже из сжатого обзора можно заключить, что возможность использования электродуговых водородных плазмотронов в составе энергетических установок представляется перспективной ввиду их способности обеспечить максимально высокую плотность передачи энергии рабочему газу, обеспечить высокое теплосодержание рабочего газа и соответственно ускоренное протекание химических процессов в газовой фазе. Большинство рассмотренных плазмотронов работает на постоянном токе,

что имеет определенные особенности эксплуатации, например, в конструкциях с самоустанавливающейся длиной дуги. При обсуждении практического использования плазменных систем, несомненно, следует учитывать все аспекты, определяющие их эффективность. В ИЭЭ РАН продолжительное время разрабатываются плазмтроны переменного тока, способные работать как с окислительными, так и с восстановительными средами [7]. С учетом накопленных знаний и опыта был создан экспериментальный образец — водородный однофазный плазмотрон переменного тока, он способен работать на инертных газах, аргоне, метане, водороде и их смесях. Его особенностью является отсутствие балластных газов (кроме момента запуска, в текущей реализации он осуществляется аргонном), что делает его особенно привлекательным для технологии по очистке природного газа от примесей, продуктов пиролиза углеводородов и др.

Плазмотрон переменного тока, представленный на рис. 1, состоит из двух корпусов 1, изготовленных из жаростойких сплавов, в каждом из которых установлены водоохлаждаемый электродный блок 2 и сменная выходная вставка из графита 4. Электродный блок состоит из водоохлаждаемого корпуса и электрода с наконечником 3, закрепленным на его торце. Наконечник в зависимости от назначения плазмотрона может быть изготовлен из вольфрама, графита, меди. В корпусе выполнен канал для тангенциальной подачи плазмообразующего газа 5. Формируемый в канале спиралевидный газовихревой поток охлаждает и стабилизирует плазменный канал. На сопловом блоке закреплен фланец 6, при этом между корпусом и внутренней стенкой образуется полость для подачи воды с целью обеспечения теплоотвода из зоны зажигания дуги. Каналы электродов расположены на одной оси и присоединены к реакционной камере 7. Камера выполняет функцию плазмохимического реактора при подаче обрабатываемого материала.

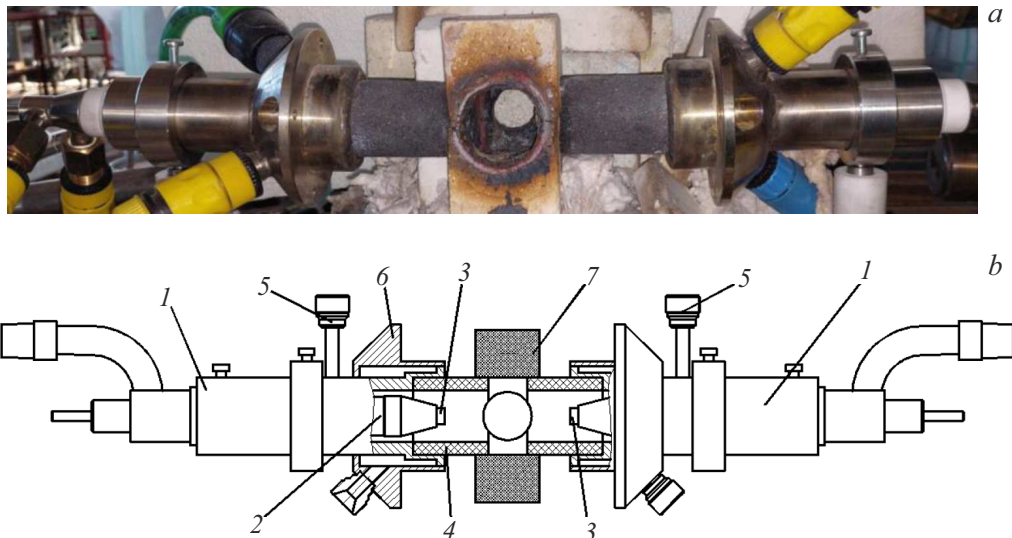


Рис. 1. *a* — внешний вид плазматрона. *b* — схема (вид сверху). 1 — корпус, 2 — электродный блок, 3 — наконечник, 4 — графитовая вставка, 5 — подача газа, 6 — фланец, 7 — реакционная камера.

Характеристики водородных плазматронов

Тип плазматрона	Мощность, kW	Расход, g/s	Напряжение, kV	Ток, А	Лит. ссылка
Осевая схема с пористой межэлектродной вставкой	$1.18 \cdot 10^3$	30	3	400	[3]
Линейная схема	48–64	0.9–1.2	0.9	600	[4]
Вихревой с продольным обдувом и секционированной межэлектродной вставкой	$5 \cdot 10^3$	35–70	2–2.4	600–940	[5]
Линейный с вихревой стабилизацией	200	2	—	800	[6]

Включение плазматрона осуществляется высоковольтным источником питания при напряжении 6–10 kV. Сначала происходит пробой воздушного промежутка между стенкой канала и элементом наконечника электрода. Затем загорается дуга, которая перемещается под воздействием газового потока. Дуги каждого канала, развиваясь, выходят на торцы электродов и замыкаются друг с другом за пределами торцов.

Результаты исследований получены на стенде, состоящем из плазматрона переменного тока, источника питания, системы подачи охлаждающей жидкости и плазмообразующих газов, системы измерений. На данном этапе работ определялись параметры, необходимые для практического использования плазматронов. И для этого важной характеристикой является зависимость падения напряжения на дуге от тока и расхода различных плазмообразующих газов. В работе определялись и фиксировались устойчивые рабочие режимы по величине подачи, соотношению газов в смеси и др. В экспериментах расход водорода варьировался в пределах до 0.25 g/s, расход метана — до 0.01 g/s, мощность плазматрона на-

ходила в диапазоне 6–10 kW. В результате были получены электрические и энергетические характеристики в широком диапазоне параметров. Динамика горения дуги характеризуется соответствующими осциллограммами, приведенными на рис. 2.

Изменение величины тока во времени синусоидально, кривая напряжения имеет выраженные пики зажигания и погасания при переходе через нуль. Полный период напряжения можно разбить на три участка. Первый и третий участки (боковые грани трапеции) — это участки подъема и спада напряжения в межэлектродном промежутке. Дуга между данными электродами в это время не горит. Второй участок характеризуется тем, что напряжение колеблется около средней величины, в отдельные полупериоды наблюдается небольшой рост напряжения к середине второго участка (это участок горения дуги). В зависимости от рода газа диапазон изменения пиковых напряжений находится в пределах от 1200 до 4000 V. На рис. 3 показана зависимость напряжения от расхода водорода, имеющая ярко выраженный растущий характер.

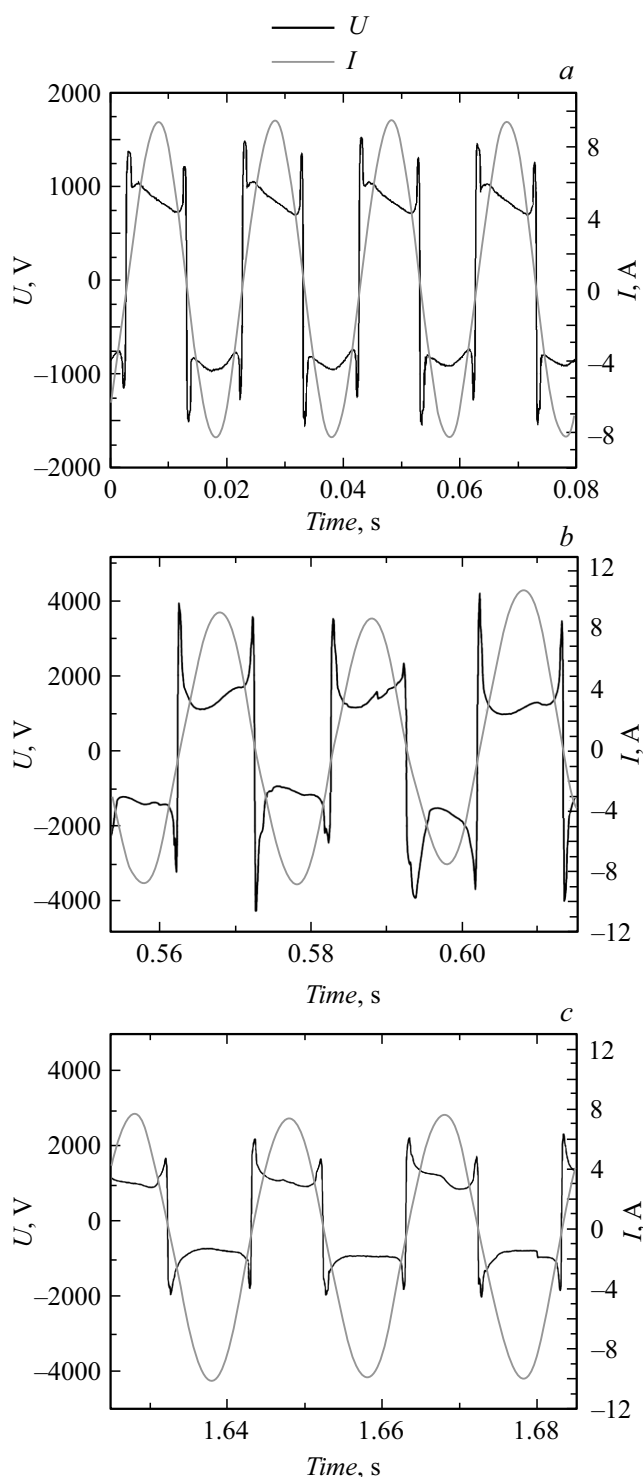


Рис. 2. Характерные осциллограммы напряжений и токов. *a* — расход 0.01 g/s CH₄, *b* — расход 0.03 g/s H₂, *c* — расход 0.01 g/s CH₄ + 0.03 g/s H₂.

В предварительных экспериментах при анализе химического состава отходящих газов для плазмообразующей газовой смеси, состоящей из H₂ с расходом 0.008 g/s и CH₄ с расходом 0.01 g/s, была зафиксирована степень конверсии метана, которая составила до 89% [8].

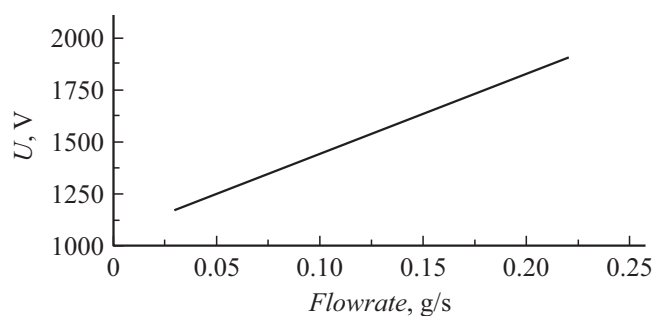


Рис. 3. Зависимость напряжения от расхода H₂.

Полученные результаты позволяют приступить к разработке и проектированию многофазного водородного плазмотрона мощностью до 50 kW. Подобные устройства могут быть востребованы при разработке плазмохимических технологий в том числе и для ресурсодобывающих отраслей промышленности. При этом круг задач, для решения которых может использоваться такой плазмотрон, достаточно широк. К ним помимо просто нагрева различных материалов можно отнести очистку и пиролиз природного газа, его переработку и т.д. Благодаря высокой тепловой эффективности, возможности использовать природный газ в качестве плазмообразующего, отсутствию транспортных и балластных газов, простоте конструкции плазмотрона и надежности его системы питания промышленное применение подобных генераторов может быть весьма выгодным и перспективным как с технической, так и с экономической точки зрения.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Д.А. Карпов, В.Н. Литуневский, *Плазменные технологии для модификации поверхности, синтеза наноматериалов и использования в водородной энергетике* (СПбГЭТУ «ЛЭТИ», СПб., 2020), с. 360–388.
- [2] И.А. Макарян, И.В. Седов, *Рос. хим. журн.*, **65** (2), 3 (2021). DOI: 10.6060/rcj.2021652.1 [I.A. Makaryan, I.V. Sedov, *Russ. J. Gen. Chem.*, **91** (9), 1912 (2021). DOI: 10.1134/S1070363221090371].
- [3] А.В. Пустогаров, А.Б. Карабут, Г.Н. Мельников, Б.М. Никитин, Д.Ю. Пахомов, В.Я. Якубов, *ТВТ*, **22** (2), 382 (1984). <https://www.mathnet.ru/links/20cb20f3e9324e11d40bf4935620fbf2/tvt5663.pdf>
- [4] А.И. Веремейчик, С.Р. Онысько, М.И. Сазонов, В.М. Хвиевич, *Вестн. БрГТУ*, № 3 (126), 79 (2021). DOI: 10.36773/1818-1112-2021-126-3-79-81
- [5] О.Г. Пенязьков, В.М. Асташинский, С.М. Данилова-Третьяк, *Вестн. НПО им. С.А. Лавочкина*, № 3 (29), 28 (2015). <https://www.laspace.ru/upload/iblock/63c/u3amyu4vpsgg3swv2hfbvbnmlm35cbz3.pdf>

- [6] М.Ф. Жуков, И.М. Засыпкин, А.И. Янковский, Ю.И. Сухинин, А.С.Аньшаков, В.Н. Фокин, *Электродуговые нагреватели водорода: оперативно-информационный материал* (Ин-т теплофизики СО АН СССР, Новосибирск, 1989), с. 1–74.
- [7] А.А. Сафронов, В.Е. Кузнецов, О.Б. Васильева, Ю.Д. Дудник, В.Н. Ширяев, ПТЭ, № 2, 58 (2019). DOI: 10.1134/S0032816219020307 [А.А. Safronov, V.E. Kuznetsov, O.B. Vasilieva, Yu.D. Dudnik, V.N. Shiryaev, *Instrum. Exp. Tech.*, **62** (2), 193 (2019). DOI: 10.1134/S0020441219020246].
- [8] Ю.Д. Дудник, В.Е. Кузнецов, А.А. Сафронов, В.Н. Ширяев, О.Б. Васильева, Д.И. Субботин, Д.А. Гаврилова, М.А. Гаврилова, в сб. *LI Междунар. Звенигород. конф. по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (ICPAF-2024)* (М., 2024), с. 171. DOI: 10.34854/ICPAF.51.2024.1.1.129