

УДК 533.9.07, 66.092-977  
EDN: ZAURDX

PACS: 52.75.Hn, 82.30.Lp

## Пароводяная конверсия метана с использованием плазмотрона переменного тока мегаваттной мощности

© С. Г. Ребров\*, В. В. Кошлаков, А. Н. Голиков, И. А. Федоров,  
В. А. Голубев, Д. А. Гоза

АО ГНЦ «Центр Келдыша», Москва, 125438 Россия

\*E-mail: rebrov\_sergey@mail.ru

Статья поступила в редакцию 9.02.2026; после доработки 26.02.2026; принята к публикации 5.06.2026

Шифр научной специальности: 1.3.9

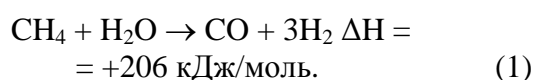
*Представлены результаты исследования пароводяной конверсии метана с использованием трехфазного плазмотрона переменного тока мегаваттной мощности, в котором метан служит рабочим газом. Режим предусматривал одновременную подачу метана в дуговые каналы, а воды – в камеру плазмотрона. Выявлена двухстадийная схема превращений: на первой стадии происходит пиролиз метана в дуговых каналах; на второй — пароводяная конверсия продуктов пиролиза при контакте с водой в камере. Получены экспериментальные данные о влиянии соотношения расходов метана и воды на концентрацию продуктов пиролиза. Режимы работы плазмотрона в ходе исследований варьировались в следующих диапазонах: дуговая мощность – от 1,32 до 1,61 МВт, расход метана – от 43 до 57,5 г/с, расход воды – от 0 до 67 г/с.*

*Ключевые слова:* плазмотрон, электрическая дуга, получение водорода, пиролиз метана, конверсия метана, синтез-газ.

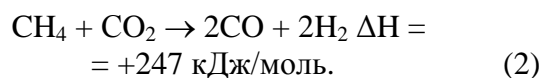
DOI: 10.51368/1996-0948-2026-3-47-53

### Введение

Пароводяная конверсия метана является одним из методов получения синтез-газа, который является промежуточным сырьем во многих химических технологиях. Существует несколько методов его получения из природного газа: паровая каталитическая конверсия, CO<sub>2</sub> конверсия и парциальное окисление [1–3]. При паровой конверсии метан вступает в реакцию с водяным паром под давлением 0,3–2,5 МПа в присутствии катализатора с образованием синтез-газа. Реакция (1) является эндотермической, энергия, необходимая для осуществления реакции, должна быть получена из внешнего источника. В настоящее время паровой риформинг метана является основным промышленным методом получения водорода:



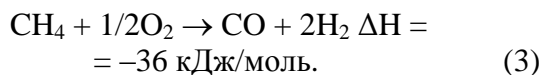
При CO<sub>2</sub> конверсии метан вступает в реакцию с диоксидом углерода, образуя синтез-газ с повышенным содержанием монооксида углерода. Этот метод в последнее время вызвал значительный интерес благодаря одновременному использованию и сокращению выбросов двух распространенных и нежелательных парниковых газов CH<sub>4</sub> и CO<sub>2</sub>.



В результате этого процесса образуется синтез-газ с молярным соотношением H<sub>2</sub>/CO, близким к 1, что наиболее подходит для дальнейшего синтеза методом Фишера-Тропша.

Обе реакции (1) и (2) являются сильно эндотермическими, требующими подвода энергии.

Парциальное окисление метана также является привлекательным альтернативным методом получения синтез-газа (3). Реакция является экзотермической, снижающей энергозатраты на процесс риформинга.



Рассмотренные выше неплазменные технологии обладают ограничениями, связанными с необходимостью использования катализаторов, которые в ходе процесса постепенно дезактивируются при высоких температурах из-за агломерации и осаждения углерода.

В отличие от указанных традиционных технологий плазменный риформинг обладает рядом важных преимуществ – в частности, высоким качеством получаемого газа и простотой контроля его состава, компактностью, быстрым временем отклика, совместимостью с широким спектром углеводородов и устранением проблем с катализаторами. Более того, плазменные технологии являются экологически чистыми процессами, поскольку они не выделяют парниковых газов.

Плазменные технологии основаны на использовании неравновесной плазмы, либо на термической плазме. В качестве неравновесной плазмы используются коронный разряд [4], микроволновый разряд [5], скользящие дуги [6], барьерный разряд [7], тлеющий разряд [8]. В этом случае образуются активные частицы, участвующие в химическом механизме, однако обрыв цепи химического процесса на эндотермических стадиях крайне вероятен. Поэтому данные методы очень энергозатратны и могут использоваться только совместно с катализаторами.

В устройствах большей производительности используется термическая плазма диоксида углерода [9, 10] и водяного пара [11]. В этом случае степень превращения и селективности определяются температурой процесса. Заметное превращение метана под действием водяного пара и углекислого газа наступает при высоких температурах (выше 1100 °C) [12]. При этом более высокие температуры приводят к повышению селективности

по ацетилену. Экономические особенности данного метода определяются сроком службы электродного блока, производительностью и эффективностью использования электрической энергии [13].

### Условия проведения экспериментов и их анализ

В настоящей работе в качестве источника плазменного нагрева метана и воды использовался плазмотрон переменного тока «Звезда» мегаваттной мощности (рис. 1). Конструктивные особенности плазмотрона и описание работы на различных газах приведено в работах [14–19]. В данной работе подача метана осуществлялась в дуговые каналы (электроды), поз. 1 на рис. 1, а вода подавалась в камеру плазмотрона, поз. 2 на рис. 1. Для работы на метане и использования плазмотрона в плазмохимических технологиях конструкция плазмотрона была доработана с целью избежать отрицательных эффектов, связанных с возможностью осаждения углерода в области изоляторов и мест вдува метана в дуговые каналы [20–22]. К камере, поз. 2 на рис. 1, через сопло, поз. 7 на рис. 1, пристыкован насадок, поз. 8 на рис. 1, предназначенный для увеличения времени пребывания продуктов пиролиза, в конце насадка производится отбор газа для хроматографического анализа по каналу, поз. 10 на рис. 1. Измерение газового состава продуктов пиролиза проводилось с использованием хроматографа Кристаллюкс 4000М, газ-носитель – аргон. Продукты пиролиза истекают через сопло насадка, поз. 9 на рис. 1, в испытательный бокс и сгорают в атмосфере, как это показано на рис. 2. Суммарный объем камеры и насадка составляет 2,8 л, а суммарное время пребывания продуктов пиролиза ~ 2,5 мс.

Описанная схема подачи плазмообразующего газа в дуговые каналы и жидкости в камеру использовалась ранее [14] при плазменной газификации водоугольной суспензии (ВУС) состава 40 % H<sub>2</sub>O, 60 % С при мощности плазмотрона на уровне 680 кВт, расходе плазмообразующего газа 97 г/с, расходе ВУС 70 г/с.

В настоящей работе мощность плазмотрона изменялась в диапазоне от 1,32 до 1,61 МВт,

а КПД, измеряемый по теплопотерям в систему охлаждения плазмотрона, составлял  $\eta = 85 \%$ .

В таблице 1 приведены параметры испытаний. Во всех экспериментах, кроме № 7, в камеру подавалась вода. Удельный энерговыход в метан и воду (табл. 1), рассчитывался как:

$$N_{уд} = N_d \cdot \eta / (G_{CH_4} + G_{H_2O}),$$

где  $G_{CH_4}$ ,  $G_{H_2O}$  – расходы метана и воды;  $N_d$  – дуговая мощность.

Давление в камере плазмотрона  $P_k$  изменялось в диапазоне от 0,21 до 0,25 МПа и определялось как величинами расходов метана и воды, так и диаметрами выходных сопел насадка  $d_n$  и камеры плазмотрона  $d_c$ .

В таблице 2 приведены результаты измерения объемных долей  $v$  продуктов пиролиза и массовые доли  $\mu$ , полученные расчетным путем. Расчет массовых долей основывался на результатах измерения объемных долей и на условии сохранения количества атомов углерода, водорода и кислорода в смеси метана и воды с суммарным расходом  $G_{CH_4} + G_{H_2O}$ . Доля воды, вступившей в реакцию, определялась с использованием объемных долей CO в продуктах пиролиза. Принималось, что оставшая непрореагировавшая вода выбрасывалась с факелом. В последнем столбце таблицы 2 приведено  $v_{H_2}/v_{CO}$  – отношение объемных долей  $H_2$  и CO.

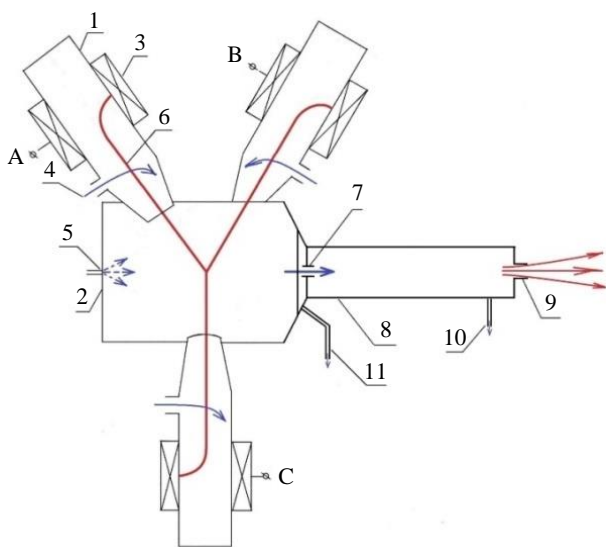


Рис. 1. Схема плазмотрона «Звезда»: 1 – электрод; 2 – камера; 3 – магнитные катушки; 4 – подача  $CH_4$  в электроды; 5 – подача  $H_2O$  в камеру плазмотрона; 6 – электрическая дуга; 7 – выходное сопло камеры; 8 – насадок; 9 – сопло на выходе насадка; 10, 11 – забор пробы для хроматографического анализа

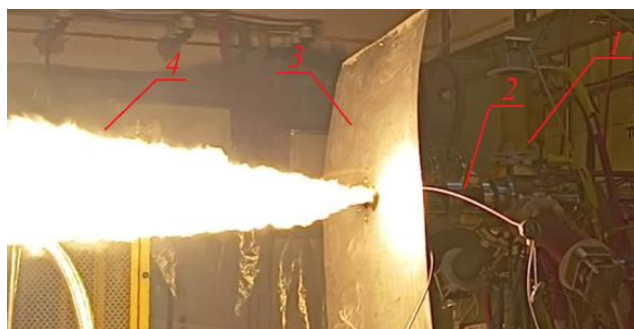


Рис. 2. Фотография запуска плазмотрона: 1 – плазмотрон; 2 – насадок; 3 – защитный экран; 4 – горение продуктов пиролиза в атмосфере

На рис. 3 приведена зависимость объемных долей продуктов пиролиза от отношения расходов  $G_{H_2O}/G_{CH_4}$  на входе. Как видно, концентрация водорода по мере увеличения расхода подаваемой воды снижается с 82 % до 74 %. В свою очередь, концентрация CO также снижается, но более существенно, с 15,8 % до 10 %. Имеет место значительное увеличение концентрации ацетилена по мере роста расхода воды: с 1 % до 8 %, растет также доля этилена и непрореагировавшего метана. В газообразных продуктах пиролиза вода не фиксировалась вследствие её конденсации в магистрали подключения заборного устройства, ведущей к хроматографу. Отношение объемных долей  $v_{H_2}/v_{CO}$  с ростом расхода воды в камеру плазмотрона увеличивается с 5,2 до 7,3 (кривая 6 на рис. 3).

О концентрации воды и углерода можно судить из зависимостей распределения массовых долей в табл. 2 и на рис. 4, где приведены расходы продуктов пиролиза непосредственно в г/с. При минимальной подаче воды  $G_{H_2O}/G_{CH_4} = 0,55$  массовая доля воды в пиролизном газе минимальная и составляет 2,6 %, остальная вода вступила в реакцию. При этом степень превращения метана составляет более 99 %. По мере роста  $G_{H_2O}/G_{CH_4}$  концентрация воды в пиролизном газе увеличивается до 48 % по массе. На рис. 4 также приведена зависимость равновесных температур в камере  $T_p$  (кривая 8), полученная расчетным путем [23] с использованием данных по удельным энергозатратам  $N_{уд}$ . Видно, что увеличение  $G_{H_2O}/G_{CH_4}$  на входе приводит к падению  $T_p$ , при этом уменьшение содержания CO и C сопровождается увеличением содержания ацетилена более, чем в 4 раза.

Таблица 1

## Условия проведения экспериментов

№ эксперимента	$G_{\text{CH}_4}$ , г/с	$G_{\text{H}_2\text{O}}$ , г/с	$G_{\text{H}_2\text{O}}/G_{\text{CH}_4}$	$N_d$ , кВт	$N_{\text{уд}}$ , МДж/кг	$d_c$ , мм	$d_n$ , мм	$P_k$ , МПа
1	43,28	24	0,555	1,61	20,62	30	32	0,216
2	44,99	36	0,800	1,52	16,17	30	32	0,235
3	44,08	36	0,817	1,49	15,97	30	32	0,233
4	47,2	66	1,398	1,32	10,02	30	32	0,246
5	46,95	67	1,427	1,35	10,21	30	28	0,241
6	46,92	67	1,428	1,64	12,39	30	28	0,238
7	57,54	0	0	1,384	20,67	30	60	0,182

Таблица 2

## Состав продуктов пиролиза

№ эксперимента		$\text{H}_2$	$\text{C}_2\text{H}_4$	$\text{C}_2\text{H}_2$	$\text{CH}_4$	$\text{CO}$	$\text{C}$	$\text{H}_2\text{O}$	$\nu_{\text{H}_2}/\nu_{\text{CO}}$
1	$\nu$ , %	82,18	0,48	1,02	0,49	15,83	0	0	5,19
	$\mu$ , %	19,07	1,56	3,08	0,91	51,43	21,35	2,61	
2	$\nu$ , %	77,82	0,45	5,17	1,95	14,62	0	0	5,32
	$\mu$ , %	14,77	1,2	12,75	2,96	38,84	10,01	19,48	
3	$\nu$ , %	78,87	0,597	5,23	1,06	14,24	0	0	5,53
	$\mu$ , %	14,83	1,57	12,78	1,59	37,51	10,87	20,84	
4	$\nu$ , %	74,68	0,65	8,12	5,78	10,77	0	0	6,93
	$\mu$ , %	9,17	1,12	12,94	5,68	18,52	6,17	46,39	
5	$\nu$ , %	74,99	0,91	7,89	6,12	10,07	0	0	7,44
	$\mu$ , %	8,89	1,51	12,17	5,81	16,72	6,85	48,05	
6	$\nu$ , %	74,61	0,77	8,12	6,3	10,20	0	0	7,31
	$\mu$ , %	8,86	1,28	12,54	5,99	16,97	6,46	47,91	
7	$\nu$ , %	77,61	0,97	12,29	9,13	0	0	0	-
	$\mu$ , %	17,62	3,08	36,28	16,59	0,000	26,42	0,000	

С использованием зависимости  $T_p$  от  $G_{\text{H}_2\text{O}}/G_{\text{CH}_4}$ , приведенной на рис. 4, были проведены расчеты  $\nu_{\text{H}_2}/\nu_{\text{CO}}$  в равновесном приближении с использованием [23] (кривая 7 на рис. 3). Как видно, характер кривой, полученной в результате расчетов, существенно отличается от экспериментальной: увеличение  $G_{\text{H}_2\text{O}}/G_{\text{CH}_4}$  приводит к уменьшению  $\nu_{\text{H}_2}/\nu_{\text{CO}}$  до  $\sim 3,2$ , в то время как в эксперименте имеет место увеличение  $\nu_{\text{H}_2}/\nu_{\text{CO}}$  (кривая 6 на рис. 3). Это объясняется неравновесностью процессов в камере. Подтверждением этому являются результаты, полученные без подачи воды в камеру (строка 7 в табл. 1 и 2). При этом состав измерялся непосредственно перед входом в насадок через имеющийся канал забора газа, поз. 11 на рис. 1. Как видно, в этом случае максимальная концентрация имеет место

для ацетилена, что свидетельствует о неравновесности процессов из-за малого времени пребывания. В результате, при подаче в камеру из форсунки вода взаимодействует как с неразложившимся метаном (16,6 % по массе), так и с ацетиленом (36,3 % по массе). Процесс взаимодействия ацетилена с водой достаточно исследован при низких температурах (реакция Кучерова). Для высоких температур, без катализаторов, кинетический процесс мало исследован. Однако, равновесный расчет показывает, что, например, при  $G_{\text{H}_2\text{O}}/G_{\text{C}_2\text{H}_2} \sim 1$  и температуре 1500 К продукты пиролиза состоят из  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{C}$  в соотношении мольных долей 4,4 : 2,5 : 1, при отсутствии  $\text{C}_2\text{H}_2$ . Это косвенно подтверждает двухстадийный характер пароводяной конверсии метана в рассматриваемой конструкции.

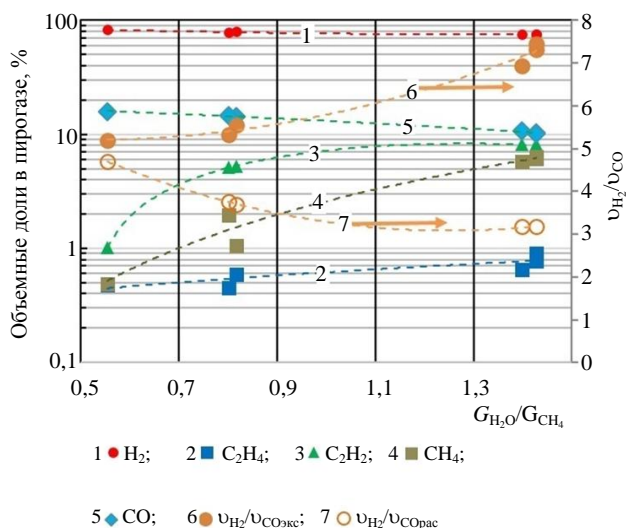


Рис. 3. Зависимость объемных долей продуктов пиролиза от отношения  $G_{H_2O}/G_{CH_4}$

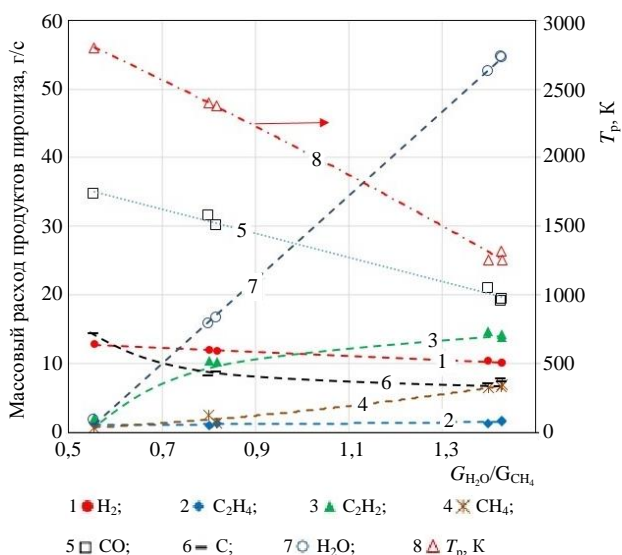


Рис. 4. Зависимость массовых расходов продуктов пиролиза от отношения  $G_{H_2O}/G_{CH_4}$

### Заключение

1. Продемонстрирована возможность автономной работы плазмотрона переменного тока мегаваттной мощности на метане, а также при подаче воды для осуществления пароводяной конверсии метана, в процессе которой метан подавался в дуговые каналы плазмотрона, а вода – в камеру плазмотрона. Получены данные по влиянию соотношения расходов метана и воды на концентрацию продуктов пиролиза. Режимы работы плазмотрона варьировались в следующих диапазонах: дуговая мощность от 1,32 до 1,61 МВт, расход метана от 43 до 57,5 г/с, расход воды от 0 до 67 г/с.

2. Показано, что снижение соотношения расходов воды и метана до  $G_{H_2O}/G_{CH_4} = 0,55$  приводит к получению минимального соотношения  $v_{H_2}/v_{CO} \sim 5,2$  при степени пиролиза метана более 99 %. При увеличении  $G_{H_2O}/G_{CH_4}$  до  $\sim 1,42$  соотношение  $v_{H_2}/v_{CO}$  увеличивается до  $\sim 7,3$ .

3. Установлено, что на исследованные процессы существенное влияние оказывает неравновесность вследствие малого времени пребывания продуктов пиролиза, а сам процесс разложения происходит по двухстадийной схеме: пиролиз метана в дуговых каналах – на первой стадии с последующей пароводяной конверсией совместно с водой, подаваемой в камеру плазмотрона – на второй стадии.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Holladay J. D., Hu J., King D. L., Wang Y. / Catalysis Today. 2009. Vol. 139. P. 244–260.
- Lubitz W., Tumas B. / Chem Rev. 2007. Vol. 107. № 10. P. 3900–3903.
- Oyama S. T., Hacarlioglu P., Gu Y., Lee D. / Int J Hydrogen Energy. 2012. Vol. 37. P. 10444–10450.
- Nguyen H., Kim K. / Catalysis Today. 2015. Vol. 256. P. 88–95.
- Czyrkowski D., Hrycak B., Jasiński M., Dors M., Mizeraczyk J. / Energy. 2016. Vol. 113. P. 653–661.
- Shekhawat D., Spivey J. J., Berry D. Fuel Cells: Technologies for Fuel Processing. – Amsterdam: Elsevier Science, 2011.
- Górska A., Krawczyk K., Jodzis S., Schmidt-Szałowski K. / Fuel. 2011. Vol. 90. № 5. P. 1946–1952.
- Guo F., Xu J.-Q., Chu W. / Catalysis Today. 2015. Vol. 256. № 1. P. 124–129.
- Tao X., Qi F., Yin Y., Dai X. / International Journal of Hydrogen Energy. 2008. Vol. 33. № 4. P. 1262–1265.
- Yanpeng S., Yong N., Angshan W., Dengxiang J., Fengwen Y., Jianbing J. / Plasma Science and Technology. 2012. Vol. 14. P. 252–256.
- Rutberg G., Kuznetsov V. A., Popov V. E., Popov S. D., Surov A. V., Subbotin D. I., Bratsev A. N. / Applied Energy. 2015. Vol. 148. P. 159–168.
- Boulos M. I., Fauchais P., Pfender E. Thermal Plasmas: Fundamentals and Applications. – New York: Springer Science+Business Media, 1994.
- SriBala G., Michiels D., Leys C., Van Geem K. M., Marin G. B., Nikiforov A. / Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 209. P. 655–664.
- Кошляков 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. 374–384.
- Коротеев А. С., Миронов В. М., Свирчук Ю. С. Плазмотроны: конструкции, характеристики, расчет. – М.: Машиностроение, 1993.

16. Svirchuk Y. S., Golikov A. N. / IEEE Transaction on Plasma Science. 2016. Vol. 44. № 12. P. 3042.

17. Голиков А. Н., Зайкин Н. С., Свирчук Ю. С. Трехфазный электродуговой плазматрон и способ его запуска. Патент на изобретение № 2577332 (РФ). 2016.

18. Голиков А. Н., Кочетков Ю. М., Полянский М. Н., Свирчук Ю. С. / Тепловые процессы в технике. 2009. Т. 1. № 9. С. 390–396.

19. Кошлаков В. В., Ребров С. Г., Голиков А. Н., Федоров И. А. / Прикладная физика. 2021. № 4. С. 32–39.

20. Кошлаков В. В., Волков Н. Н., Козаев А. Ш. Плазмохимический способ получения синтез-газа и

установка для его осуществления. Патент на изобретение № 2699124 (РФ). 2019.

21. Коротеев А. С. Способ получения водорода и ацетилена и установка для его реализации. Патент на изобретение № 2765466 (РФ). 2021.

22. Кошлаков В. В., Ребров С. Г., Голиков А. Н., Федоров И. А. Способ получения водорода и технического углерода из природного газа. Патент на изобретение № 2803529 (РФ). 2022.

23. Трусов Б. Г. / Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2012. № 1 (1). С. 240–249.

PACS: 52.75.Hn, 82.30.Lp

## Steam-water reforming of methane using a AC plasmatron of megawatt power

S. G. Rebrov\*, V. V. Koshlakov, A. N. Golikov, I. A. Fedorov,  
V. A. Golubev, and D. A. Goza

SSC Keldysh Research Centre. 8 Onezhskaya Str., Moscow 125438, Russian Federation

\* E-mail: rebrov\_servey@mail.ru

Received 9.02.2026; revised 26.02.2026; accepted 5.06.2026

*This paper presents the results of a study of steam-water conversion of methane using a three-phase AC plasmatron of megawatt power operating on methane. The process was carried out with the simultaneous supply of methane to the arc channels of the plasmatron and water to the plasmatron chamber. It was established that the studied methane decomposition process occurs according to a two-stage scheme: methane pyrolysis in the arc channels in the first stage, followed by steam-water conversion together with water supplied to the plasmatron chamber in the second stage. Data on the influence of the ratio of methane and water consumption on the concentration of pyrolysis products were obtained. The plasmatron operating modes during the study varied within the following ranges: arc power from 1.32 to 1.61 MW, methane flow rate from 43 to 57.5 g/s, and water flow rate from 0 to 67 g/s.*

**Keywords:** plasmatron, electric arc, hydrogen production, methane pyrolysis, methane conversion, synthesis gas.

### REFERENCES

- Holladay J. D., Hu J., King D. L., and Wang Y., Catalysis Today **139**, 244–260 (2009).
- Lubitz W. and Tumas B., Chem Rev. **107** (10), 3900–3903 (2007).
- Oyama S. T., Hacıoğlu P., Gu Y., and Lee D., Int J Hydrogen Energy **37**, 10444–10450 (2012).
- Nguyen H. and Kim K., Catalysis Today **256**, 88–95 (2015).
- Czyłkowski D., Hrycak B., Jasiński M., Dors M., and Mizeraczyk J., Energy **113**, 653–661 (2016).
- Shekhawat D., Spivey J. J., and Berry D. Fuel Cells: Technologies for Fuel Processing; Amsterdam, Elsevier Science, 2011.
- Górska A., Krawczyk K., Jodzis S., and Schmidt-Szałowski K., Fuel **90** (5), 1946–1952 (2011).
- Guo F., Xu J.-Q., and Chu W., Catalysis Today **256**, 124–129 (2015).
- Tao X., Qi F., Yin Y., and Dai X., International Journal of Hydrogen Energy **33** (4), 1262–1265 (2008).
- Yanpeng S., Yong N., Angshan W., Dengxiang J., Fengwen Y., and Jianbing J., Plasma Science and Technology **14**, 252–256 (2012).
- Rutberg G., Kuznetsov V. A., Popov V. E., Popov S. D., Surov A. V., Subbotin D. I., and Bratsev A. N., Applied Energy **148**, 159–168 (2015).

12. Boulos M. I., Fauchais P., and Pfender E. *Thermal Plasmas: Fundamentals and Applications*. New York, Springer Science+Business Media, 1994.
13. SriBala G., Michiels D., Leys C., Van Geem K. M., Marin G. B., and Nikiforov A., *Journal of Cleaner Production* **209**, 655–664 (2019).
14. Koshlakov V. V., Rebrov S. G., Golikov A. N., Fedorov I. A., Morozov A. G., and Ilyusha A. V., *Thermal processes in engineering* **12** (8), 374–384 (2020) [in Russian].
15. Koroteyev A. S., Mironov V. M., and Svirchuk Yu. S. *Plasmatrones: design, characteristics, calculation*. Moscow: Mechanical Engineering, 1993 [in Russian].
16. Svirchuk Y. S. and Golikov A. N., *IEEE Transaction on Plasma Science* **44** (12), 3042 (2016).
17. Golikov A. N., Zaikin N. S., and Svirchuk Yu. S. Three-phase electric arc plasma generator and method for start-up thereof. Patent for invention № 2577332 (RF). 2016.
18. Golikov A. N., Kochetkov Yu. M., Polyansky M. N., and Svirchuk Yu. S., *Thermal processes in engineering* **1** (9), 390–396 (2009) [in Russian].
19. Koshlakov V. V., Rebrov S. G., Golikov A. N., and Fedorov I. A., *Applied Physics*, № 4, 32–39 (2021) [in Russian].
20. Koshlakov V. V., Volkov N. N., and Kozaev A. Sh. Plasma-chemical synthesis gas production method and installation for its implementation. Patent for invention № 2699124 (RF). 2019.
21. Koroteev A. S. Method for producing hydrogen and acetylene and installation for implementation thereof. Patent for invention № 2765466 (RF). 2021.
22. Koshlakov V. V., Rebrov S. G., Golikov A. N., and Fedorov I. A. Method for producing hydrogen and carbon black from natural gas. Patent for invention № 2803529 (RF). 2022.
23. Trusov B. G., *Bulletin of MSTU im. N. E. Bauman (Instrument engineering)* **1** (1), 240–249 (2012) [in Russian].

#### Об авторах

**Ребров Сергей Григорьевич**, д.т.н., главный научный сотрудник, АО ГНЦ «Центр Келдыша» (125438, Россия, Москва, ул. Онежская, 8). E-mail: rebrov\_sergey@mail.ru SPIN-код: 2043-8066, AuthorID: 22285

**Кошлаков Владимир Владимирович**, д.т.н., генеральный директор, АО ГНЦ «Центр Келдыша» (125438, Россия, Москва, ул. Онежская, 8). E-mail: kerc@elnet.msk.ru SPIN-код: 8524-6005, AuthorID: 171441

**Голиков Андрей Николаевич**, д.т.н., ведущий научный сотрудник, АО ГНЦ «Центр Келдыша» (125438, Россия, Москва, ул. Онежская, 8). E-mail: andgolikov@mail.ru SPIN-код: 4057-0503, AuthorID: 109401

**Федоров Иван Алексеевич**, ведущий инженер, АО ГНЦ «Центр Келдыша» (125438, Россия, Москва, ул. Онежская, 8). E-mail: fedorov@kerc.msk.ru

**Голубев Виктор Александрович**, к.т.н., старший научный сотрудник, АО ГНЦ «Центр Келдыша» (125438, Россия, Москва, ул. Онежская, 8). E-mail: golubev.va@mail.ru SPIN-код: 1991-6217, AuthorID: 617883

**Гоза Дмитрий Александрович**, заместитель начальника отдела, АО ГНЦ «Центр Келдыша» (125438, Россия, Москва, ул. Онежская, 8). E-mail: dgoza@bk.ru