

УДК 533.9.03, 537.528
EDN: PTXWBW

PACS: 52.77.-j

Конверсия CO_2 в микроволновом разряде в жидком метаноле

© Т. С. Батукаев¹, И. В. Билера¹, Г. В. Крашевская^{1,2}, Ю. А. Лебедев^{1*}, В. К. Шумилов¹¹ *Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева Российской академии наук,
Москва, 119991 Россия*** E-mail: lebedev@ips.ac.ru*² *Национальный ядерный исследовательский университет (МИФИ), Москва, 115409 Россия**Статья поступила в редакцию 20.01.2026; после доработки 9.02.2026; принята к публикации 27.04.2026*

Показана зависимость степени разложения CO_2 и концентрации основных продуктов (H_2 и CO) от скорости потока CO_2 на входе реактора. Максимальная степень разложения CO_2 достигла 75%.

Ключевые слова: микроволновый разряд в жидком метаноле, разложение CO_2 , хроматография продуктов разряда, получение синтез-газа.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-2-43-46

Введение

В настоящее время активно изучаются технологии разложения и конверсии углекислого газа (CO_2) в химически ценные продукты. Эта задача имеет важное значение для обеспечения экологической безопасности процессов, одним из продуктов которых является углекислый газ. Эффективным способом её решения является использование низкотемпературной плазмы, создаваемой различными типами электрических разрядов [1].

Исследование процесса конверсии CO_2 ведется, в основном, в плазме газовых разрядов. Известно, что добавление компонентов таких, как метан и водород, позволяет существенно повысить степень разложения CO_2 . Так, положительное влияние водорода и метана на конверсию CO_2 подтверждено в барьерных разрядах, скользящих дугах и микроволновых разрядах в газовой фазе (см., например, [2–8]). Введение паров метанола в смеси с CO_2 способствует не только увеличению степени разложения, но и образованию синтез-газа [8, 9]. Полученные степени конверсии CO_2 не превышают 20 %.

В работе [9] был продемонстрирован новый подход к плазменному преобразованию смеси CO_2 и паров метанола в устройстве со скользящей дугой при атмосферном давлении, позволяющий получить синтез-газ при одновременной конверсии CO_2 с эффективностью до 20 %. По аналогии с традиционным сухим риформингом метана, данный процесс авторами назван «сухим риформингом метанола».

Высокую степень конверсии CO_2 демонстрируют микроволновые разряды, инициируемые в жидкой фазе, где разряд зажигается в газовом пузыре у конца микроволновой антенны. Одним из важных преимуществ таких систем является естественная реализация процесса закалки продуктов процесса на этапе послесвечения разряда (после отрыва газового пузыря от антенны), вызванного испарением жидкости в горячий газовый пузырь. Это существенно повышает эффективность разложения CO_2 . В частности, в работе [10] при атмосферном давлении и использовании микроволнового разряда в жидких углеводородах была достигнута степень разложения CO_2 до 60 %. В микроволновом разряде в водном растворе этанола степень конверсии CO_2 до-

стигала 45 % [11]. Важно отметить, что в этих условиях продуктом является синтез-газ, который служит сырьем для получения различных химических соединений. Недостатком использования таких жидкостей было образование сажи. В [11] для подавления процесса сажеобразования использовался не чистый этанол, а его водный раствор, что, негативно влияло на конверсию CO_2 .

Поэтому перспективным представляется исследование конверсии CO_2 в микроволновом разряде в жидком метаноле, который является простейшим представителем гомологического ряда спиртов и в плазме которого образуются H_2 и CH_4 , но отсутствует образование сажи. [12].

В настоящей работе впервые представлены результаты экспериментального исследования конверсии CO_2 при пропускании его через микроволновый разряд в метаноле. Особый акцент сделан на определении степени разложения CO_2 и состава основных газообразных продуктов.

Экспериментальная установка

Экспериментальная установка, используемая для генерации и исследования СВЧ-разряда в жидкостях, подробно описана в [10, 11]. СВЧ-система включает в себя магнетронный СВЧ-генератор (2,45 ГГц) и элементы, необходимые для управления и измерения падающей микроволновой мощности. Эксперименты проводились при падающей микроволновой мощности 490 Вт. Разрядная секция представляет собой волноводно-коаксиальный переход, центральный проводник которого служит антенной для ввода СВЧ-энергии в реактор. Разряд создавался вблизи кончика антенны в кварцевом реакторе (диаметр 55 мм), заполненном метанолом и помещенном в защитную металлическую сетку (шаг ячеек 0,5 мм). Для облегчения возникновения разряда на расстоянии 3 мм над центральным проводником располагался стержень из вольфрама диаметром 3 мм. Центральный проводник коаксиальной линии представляет собой вольфрамовую трубку (внешний диаметр 3,0 мм, диаметр канала 1 мм), через которую в жидкость подавался углекислый газ. Объем метанола в реакторе составляет около 40 мл, что

обеспечивает расположение конца центрального электрода коаксиальной линии ниже поверхности жидкости.

CO_2 с расходом от 110 до 670 мл/мин проходил через расходомер РРГ-20 и вводился в реактор через канал в антенне. Давление над поверхностью жидкости было близко к атмосферному. Продолжительность эксперимента составляла около одной минуты. В течение этого времени измерялся поток газа на выходе из реактора и после установления стационарного режима отбиралась проба газа для анализа состава продуктов. В ходе одного эксперимента состав жидкости в реакторе не обновлялся.

Для отделения газообразных продуктов плазмохимических реакций от испаренных жидких продуктов использовался водяной холодильник. Сконденсированная жидкость возвращалась в реактор. Скорость потока газовой смеси на выходе разряда после водяного холодильника измерялась механическим расходомером.

Состав газовой фазы (CO , CO_2 , H_2 , C_2H_2 , C_2H_4 и CH_4) на выходе из реактора с разрядом определялся на портативном газовом хроматографе с обратной продувкой ПИА (НПФ МЭМС, Россия) с катарометром и двумя хроматографическими колонками с использованием адсорбентов Hayesep N и молекулярных сит 13X. Газ-носитель – аргон.

Основными продуктами разряда являются H_2 и CO . К неосновным компонентам смеси относятся CO_2 , CH_4 , C_2H_2 и C_2H_4 . В настоящей работе мы концентрируем внимание на изучении процесса разложения CO_2 и производства синтез-газа.

Степень разложения CO_2 (α) рассчитывали по скоростям потока продуктов на выходе из реактора по формулам:

$$\alpha = \frac{\text{CO}_2^{\text{вх}} - \text{CO}_2^{\text{вых}}}{\text{CO}_2^{\text{вх}}} \cdot 100 \% \quad (1)$$

где $\text{CO}_2^{\text{вх}}$ – скорость потока CO_2 на выходе реактора, а $\text{CO}_2^{\text{вых}}$ – скорость потока CO_2 на входе в реактор. Эти величины получены по измеренной суммарной скорости потока газов на выходе реактора и соответствующей концентрации компонент.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 показаны зависимости концентраций основных компонентов газовой смеси на выходе разряда от скорости потока CO_2 на входе реактора. Уменьшение концентрации водорода при увеличении скорости потока CO_2 связано, по-видимому, с разбавлением паров метанола углекислым газом, а также с уменьшением времени пребывания реакционной смеси в области разряда. Заметим, что время пребывания уменьшается и из-за уменьшения времени жизни газового пузыря с плазмой при увеличении скорости потока CO_2 .

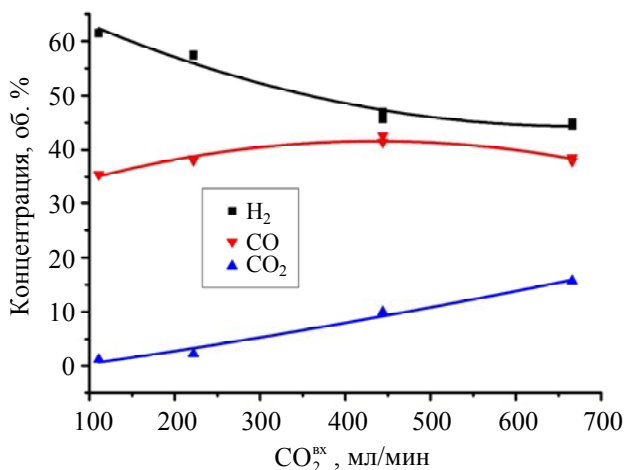


Рис. 1. Зависимость концентраций основных продуктов от потока CO_2

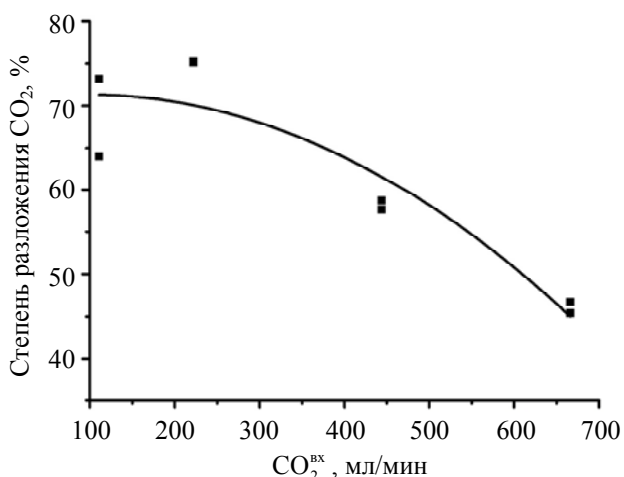


Рис. 2. Зависимость степени разложения CO_2 от потока CO_2 на входе

На рис. 2 показана зависимость степени разложения CO_2 от скорости его потока на входе реактора. Уменьшение степени разложения CO_2 связано с уменьшением времени пребывания реакционной смеси в области разряда.

Заключение

Представленные результаты показывают, что микроволновый разряд в жидком метаноле может быть эффективным средством разложения углекислого газа при одновременном получении синтез газа. Полученная степень конверсии углекислого газа превышает значения, полученные в микроволновом разряде в водном растворе этанола.

Работа выполнена в рамках Госзадания ИХС РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bogaerts A., Centi G. / Front. Energy Res. 2020. Vol. 8. P. 111.
2. Aerts R., Snoeckx R., Bogaerts A. / Plasma Process. Polym. 2014. Vol. 11. № 10. P. 985.
3. Kim S. C., Lim M. S., Chun Y. N. / Plasma Chem. Plasma Process. 2014. Vol. 34. P. 125.
4. Van Alphen S., Wanten B., Girard-Sahun F., Slaets J., Creel J., Aghaei M., Bogaerts A. / Sustain. Chem. Eng. 2024. Vol. 12. № 42. P. 15715.
5. Mei D., Duan G., Fu J., Liu S., Zhou R., Zhou R., Ostrikov K. K. / J. CO2 util. 2021. Vol. 53. P. 101703.
6. Wanten B., Gorbaney Y., Bogaerts A. / Fuel. 2024. Vol. 374. P. 132355.
7. Kelly S., Mercer E., De Meyer R., Ciocarlan R. G., Bals S., Bogaerts A. / J. CO2 Util. 2023. Vol. 75. P. 102564.
8. Czyilkowski D., Hrycak B., Miotk R., Jasinski M., Dors M., Mizeraczyk J. / Int. J. Hydrogen Energy. 2015. Vol. 40. № 40. P. 14039.
9. Zhang H., Li X., Zhu F., Cen K., Du C., Tu X. / Chem. Eng. J. 2017. Vol. 310. P. 114.
10. Batukaev T. S., Bilera I. V., Krashevskaya G. V., Lebedev Y. A., Nazarov N. A. / Plasma. 2023. Vol. 6. № 1. P. 115.
11. Батукаев Т. С., Билера И. В., Крашевская Г. В., Лебедев Ю. А., Шумилов В. К. / Письма в ЖТФ. 2025. Т. 51. № 21. С. 50.
12. Niu Y. L., Li S. Z., Wang X. C., Cao S. L., Yang D., Zhang J. / J. Appl. Phys. 2023. Vol. 134. № 1. P. 013304.

Conversion of CO₂ in microwave discharge in liquid methanol

T. S. Batukaev¹, I. V. Bilera¹, G. V. Krashevskaya^{1,2}, Yu. A. Lebedev^{1*}, and V. K. Shumilov¹

¹ A. V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis of the Russian Academy of Sciences (TIPS RAS),
Moscow, 119991 Russia

* E-mail: lebedev@ips.ac.ru

² Institute LAPLAZ, National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, 115409 Russia

Received 20.01.2026; revised 9.02.2026; accepted 27.04.2026

The dependence of the degree of CO₂ decomposition and the concentration of the main products (H₂ and CO) on the CO₂ flow rate at the reactor inlet is shown. The maximum degree of CO₂ decomposition reached 75 %.

Keywords: microwave discharge in liquid methanol, CO₂ decomposition, chromatography of discharge products, production of synthesis gas.

REFERENCES

1. Bogaerts A. and Centi G., *Front. Energy Res.* **8**, 111 (2020).
2. Aerts R., Snoeckx R., and Bogaerts A., *Plasma Process. Polym.* **11** (10), 985 (2014).
3. Kim S. C., Lim M. S., and Chun Y. N., *Plasma Chem. Plasma Process* **34**, 125 (2014).
4. Van Alphen S., Wanten B., Girard-Sahun F., Slaets J., Creel J., Aghaei M., and Bogaerts A., *Sustain. Chem. Eng.* **12** (42), 15715 (2024).
5. Mei D., Duan G., Fu J., Liu S., Zhou R., Zhou R., and Ostrikov K. K., *J. CO₂ Util.* **53**, 101703 (2021).
6. Wanten B., Gorbanev Y., and Bogaerts A., *Fuel* **374**, 132355 (2024).
7. Kelly S., Mercer E., De Meyer R., Ciocarlan R. G., Bals S., and Bogaerts A., *J. CO₂ Util.* **75**, 102564 (2023).
8. Czytkowski D., Hrycak B., Miotk R., Jasinski M., Dors M., and Mizeraczyk J., *Int. J. Hydrogen Energy* **40** (40), 14039 (2015).
9. Zhang H., Li X., Zhu F., Cen K., Du C., and Tu X., *Chem. Eng. J.* **310**, 114 (2017).
10. Batukaev T. S., Bilera I. V., Krashevskaya G. V., Lebedev Y. A., and Nazarov N. A., *Plasma* **6** (1), 115 (2023).
11. Batukaev T. S., Bilera I. V., Krashevskaya G. V., Lebedev Y. A., and Shumilov V. K., *Pisma v Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki* **51** (21), 50–53 (2025).
12. Niu Y. L., Li S. Z., Wang X. C., Cao S. L., Yang D., and Zhang J., *J. Appl. Phys.* **134** (1), 013304 (2023).

Об авторах

Батукаев Тимур Саидэмиевич, к.ф.-м.н., научный сотрудник, Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева Российской академии наук (119991, Россия, Москва, Ленинский проспект, 29). E-mail: batukaevtimur95@gmail.com ORCID 0000-0001-8246-0868, WOS Research ID AAQ-7536-2021, SPIN-код: 4215-8220, Scopus Author ID 57209216257

Билера Игорь Васильевич, к.х.н., ведущий научный сотрудник, Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева Российской академии наук (119991, Россия, Москва, Ленинский проспект, 29). E-mail: bilera@ips.ac.ru ORCID 0000-0001-6724-1907, WOS Research ID E-6524-2014, SPIN-код: 5140-8527, Scopus Author ID 6603277297

Крашевская Галина Витальевна, к.ф.-м.н., доцент, Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева Российской академии наук (119991, Россия, Москва, Ленинский проспект, 29); Национальный ядерный исследовательский университет (МИФИ) (115409, Россия, Москва, Каширское шоссе, 31). E-mail: krashevskaya-gv@mail.ru ORCID 0000-0001-6724-1907, WOS Research ID N-5208-2017, SPIN-код: 1186-9514, Scopus Author ID 35776305000

Лебедев Юрий Анатольевич, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева Российской академии наук (119991, Россия, Москва, Ленинский проспект, 29). E-mail: lebedev@ips.ac.ru ORCID 0000-0001-5374-3957, WOS Research ID E-5939-2014, SPIN-код: 2509-0361, Scopus Author ID 57203810439

Шумилов Владислав Константинович, студент, Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева Российской академии наук (119991, Россия, Москва, Ленинский проспект, 29). E-mail: shumilow.vladislav@yandex.ru SPIN-код: 8718-2948, AuthorID: 1318446