

**Разложение CO_2 в барьерном разряде атмосферного давления
(аналитический обзор)***Ю. А. Лебедев, В. А. Шахатов*

Приведен аналитический обзор результатов исследований разложения углекислого газа в барьерном разряде атмосферного давления. Разложение углекислого газа CO_2 в барьерном разряде происходит неравновесных условиях в результате диссоциативного возбуждения молекулы электронным ударом. Установлено, что степень разложения углекислого газа α и энергетическая эффективность устройства η не превышают $\alpha \leq 70\%$ и $\eta \leq 23\%$, соответственно. Эти параметры зависят от геометрии разряда, от вложенной в разряд мощности, расхода газа, зазора между электродами. Одним из перспективных путей увеличения эффективности барьерного разряда является наполнение зазора между электродами гранулами из различных материалов, включая катализаторы.

Ключевые слова: барьерный разряд, углекислый газ, диссоциация, плазменный катализ.

DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-2-109-131

Лебедев Юрий Анатольевич, гл.н.с., д.ф.-м.н.

E-mail: lebedev@ips.ac.ru

Шахатов Вячеслав Анатольевич, в.н.с., д.ф.-м.н.

Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева

Российской академии наук.

Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., 29.

Статья поступила в редакцию 10 марта 2022 г.

© Лебедев Ю. А., Шахатов В. А., 2022

Работа выполнена в рамках государственного задания Института нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева РАН.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. B. M. Smirnov, *Sov. Phys. Usp.* **126**, 527 (1978).
2. C. S. Song, *Catal. Today* **115**, 2 (2006).
3. G. Centi and S. Perathoner, *Catal. Today* **148**, 191 (2009).
4. I. Omae, *Coord. Chem. Rev.* **256**, 1384 (2012).
5. I. Dimitriou, P. Garcia-Gutierrez, R. H. Elder, R. M. Cuellar-Franca, A. Azapagic, and R. W. K. Allen, *Energy Environ. Sci.* **8**, 1775 (2015).
6. E. V. Kondratenko, G. Mul, J. Baltusaitis, G. O. Larrazabal, and J. Perez-Ramirez, *Energy Environ. Sci.* **6**, 3112 (2013).
7. M. Mikkelsen, M. Jorgensen, and F. C. Krebs, *Energy Environ. Sci.* **3**, 43 (2010).
8. P. Lahijani, Z. A. Zainal, M. Mohammadi, and A. R. Mohamed, *Renew. Sustain. Energy Rev.* **41**, 615 (2015).
9. V. D. Rusanov and A. A. Fridman, *Physics of chemically active plasma*. (Nauka, Moscow, 1984) [in Russian].
10. A. Fridman, *Plasma chemistry*. (Cambridge University Press, New York, 2008).
11. R. Snoeckx and A. Bogaerts, *Chemical Society Reviews* **46**, 5805 (2017).
12. A. George, B. Shen, M. Craven, Y. Wang, D. Kang, C. Wu, and X. Tu, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **135**, 109702 (2021).
13. Yu. A. Lebedev and V. A. Shakhmatov, *Journal of Applied Chemistry* **95**, 39 (2022).
14. Yu. P. Andreev, *Soviet Journal of Physical Chemistry* **38**, 794 (1964).
15. J. Wang, G. Xia, A. Huang, S. L. Suib, Y. Hayashi, and H. Matsumoto, *J. Catal.* **185**, 152 (1999).
16. R. X. Li, Y. Yamaguchi, Y. Shu, T. Qing, and T. Sato, *Solid State Ionics* **172**, 235 (2004).
17. R. X. Li, Q. Tang, S. Yin, and T. Sato, *Fuel Process. Technol.* **87**, 617 (2006).
18. R. Li, Q. Tang, S. Yin, and T. Sato, *Appl. Phys. Lett.* **90**, 131502 (2007).
19. R. J. Leiweke and B. N. Ganguly, *Appl. Phys. Lett.* **90**, 241 (2007).
20. S. Paulussen, B. Verheyde, X. Tu, C. D. Bie, T. Martens, D. Petrovic, A. Bogaerts, and B. Sels, *Plasma Sources Sci Technol.* **19**, 034015 (2010).

21. Y. Tagawa, S. Mori, M. Suzuki, I. Yamanaka, T. Obara, J. Ryu, and Y. Kato, *Kagaku Kogaku Ronbunshu* **37**, 114 (2011).
22. Q. Yu, M. Kong, T. Liu, J. Fei, and X. Zheng, *Plasma Chem. Plasma Process.* **32**, 153 (2012).
23. S. Wang, Y. Zhang, X. Liu, and X. Wang, *Plasma Chem. Plasma Process.* **32**, 979 (2012).
24. R. Aerts, T. Martens, and A. Bogaerts, *J. Phys. Chem. C* **116**, 23257 (2012).
25. A. Michelmore, D. A. Steele, J. D. Whittle, J. W. Bradley, and R. D. Short, *RSC Adv.* **3**, 13540 (2013).
26. F. Brehmer, S. Welzel, R. M. C. M. Van De Sanden, and R. Engeln, *J. Appl. Phys.* **116**, 123303 (2014).
27. M. A. Lindon and E. E. Scime, *Front. Phys.* **2**, 1 (2014).
28. D. Mei, X. Zhu, Y.-L. He, J. D. Yan, and X. Tu, *Plasma Sources Sci. Technol.* **24**, 15011 (2014).
29. T. Kozak and A. Bogaerts, *Plasma Sources Sci. Technol.* **23**, 045004 (2014).
30. R. Aerts, W. Somers, A. Bogaerts, *ChemSusChem* **8**, 702 (2015).
31. M. Ramakers, I. Michiels, R. Aerts, V. Meynen, and A. Bogaerts, *Plasma Process Polym.* **12**, 755 (2015).
32. X. Duan, Z. Hu, Y. Li, and B. Wang, *AIChE* **61**, 898 (2015).
33. K. Van Laer and A. Bogaerts, *Energy Technol.* **3**, 1038 (2015).
34. X. Duan, Y. Li, W. Ge, and B. Wang, *Greenhouse Gases: Sci. Technol.* **5**, 131 (2015).
35. R. Snoeckx, Y. X. Zeng, X. Tu, and A. Bogaerts, *RSC Adv.* **5**, 29799 (2015).
36. D. H. Mei, X. B. Zhu, Y. L. He, J. D. Yan, and X. Tu, *Plasma Sources Sci. Technol.* **24**, 015011 (2015).
37. R. Snoeckx, S. Heijkers, K. V. Wesenbeeck, S. Lenaerts, and A. Bogaerts, *Energy Environ. Sci.* **9**, 999 (2016).
38. M. Schiorlin, R. Klink, and R. Brandenburg, *Eur. Phys. J.: Appl. Phys.* **75**, 1 (2016).
39. I. Belov, S. Paulussen, and A. Bogaerts, *Plasma Sources Sci. Technol.* **25**, 15023 (2016).
40. T. Butterworth, R. Elder, and R. Allen, *Chem. Eng. J.* **293**, 55 (2016).
41. S. Ponduri, M. M. Becker, S. Welzel, M. C. M. Van De Sanden, D. Loffhagen, and R. Engeln, *J. Appl. Phys.* **119**, 093301 (2016).
42. A. Bogaerts, C. De Bie, R. Snoeckx, and T. Kozak, *Plasma Processes Polym.* **14**, e201600070 (2016).
43. M. Grofulovic, L. L. Alves, and V. Guerra, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **49**, 395207 (2016).
44. A. Bogaerts, W. Wang, A. Berthelot, and V. Guerra, *Plasma Sources Sci. Technol.* **25**, 55016 (2016).
45. D. Mei, X. Zhu, C. Wu, B. Ashford, P. T. Williams, and X. Tu, *Appl. Catal. B Environ.* **182**, 525 (2016).
46. A. Ozkan, T. Dufour, T. Silva, N. Britun, R. Snyders, A. Bogaerts, et al., *Plasma Sources Sci. Technol.* **25**, 025013 (2016).
47. A. Ozkan, A. Bogaerts, and F. Reniers, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **50**, 84004 (2017).
48. I. Michiels, Y. Uytendhouwen, J. Pype, B. Michiels, J. Mertens, F. Reniers, V. Meynen, and A. Bogaerts, *Chem. Eng. J.* **326**, 477 (2017).
49. A. Bogaerts, A. Berthelot, S. Heijkers, St. Kolev, R. Snoeckx, S. Sun, G. Trenchev, K. Van Laer, and W. Wang, *Plasma Sources Sci. Technol.* **26**, 063001 (2017).
50. P. Koelman, S. Heijkers, S. T. Mousavi, W. Graef, D. Mihailova, T. Kozak, A. Bogaerts, and J. van Dijk, *Plasma Processes Polym.* **14**, 1600155 (2017).
51. D. Mei and X. Tu, *J. of CO₂ Utilization* **19**, 68 (2017).
52. D. Mei and X. Tu, *Chem. Phys. Chem.* **18**, 3253 (2017).
53. K. Zhang, G. R. Zhang, X. T. Liu, A. N. Phan, and K. Luo, *Ind. Eng. Chem. Res.* **56**, 3204 (2017).
54. S. J. Xu, J. C. Whitehead, and P. A. Martin, *Chem. Eng. J.* **327**, 764 (2017).
55. P. Chen, J. Shen, T. Ran, T. Yang, and Y. Yin, *Plasma Sci. Technol.* **19**, 125505 (2017).
56. N. Lu, D. Sun, C. Zhang, N. Jiang, K. Shang, X. Bao, et al., *J. Phys. D Appl. Phys.* **51**, 094001 (2018).
57. S. J. Xu, P. Khalaf, P. A. Martin, and J. C. Whitehead, *Plasma Sources Sci. Technol.* **27**, 075009 (2018).
58. B. Ashford, Y. Wang, C.-K. Poh, L. Chen, and X. Tu, *Appl. Catal. B Environ* **276**, 119110 (2020).
59. K. Zhang and A. P. Harvey, *Chemical Engineering Journal* **405**, 126625 (2021).
60. V. G. Samoilovich, V. I. Gibalov, and K. V. Kozlov, *Physical chemistry of barrier discharge*. (Publishing House of Moscow State University, Moscow, 1989).
61. B. Eliasson and U. Kogelschatz, *Plasmas IEEE Trans. Plasma Sci.* **19**, 309 (1991).
62. B. Eliasson, W. Egli, and U. Kogelschatz, *Pure Appl. Chem.* **66**, U1766 (1994).
63. U. Kogelschatz, *Plasma Chem. Plasma Process.* **23**, 1 (2003).
64. J. J. Lowke, A. V. Phelps, and B. W. Irwin, *J. Appl. Phys.* **44**, 4664 (1973).
65. T. G. Beuthe and J. S. Chang, *Japan. J. Appl. Phys.* **36**, 4997 (1997).
66. Yu. A. Lebedev and V. A. Shakhatov, *High Energy Chemistry* **55**, 419 (2021).
67. Yu. A. Lebedev and V. A. Shakhatov, *Advances of Applied Physics* **9**, 365 (2021) [in Russian].
68. H. L. Chen, H. M. Lee, S. H. Chen, and M. B. Chang, *Ind. Eng. Chem. Res.* **47**, 2122 (2008).
69. G. J. M. Haelaar and L. C. Pitchford, *Plasma Sources Sci. Technol.* **14**, 722 (2005).
70. X. Tu, H. J. Gallon, M. V. Twigg, P. A. Gorry, and J. C. Whitehead, *J. Phys. D Appl. Phys.* **44**, 274007 (2011).
71. S. Y. Liu, D. H. Mei, Z. Shen, and X. Tu, *J. Phys. Chem. C* **118**, 10686 (2014).
72. A. Meiners, M. Leck, and B. Abel, *Rev. Sci. Instrum.* **81**, 113507 (2010).
73. B. W. Wang, W. J. Yan, W. J. Ge, and X. F. Duan, *J. Energy Chem.* **22**, 876 (2013).
74. A. Indarto, D. R. Yang, J. W. Choi, H. Lee, and H. K. Song, *J. Hazard. Mater.* **146**, 309 (2007).
75. A. Ozkan, T. Dufour, A. Bogaerts, and F. Reniers, *Plasma Sources Sci. Technol.* **25**, 045016 (2016).
76. D. H. Mei, Y.-L. He, S. Y. Liu, J. D. Yan, and X. Tu, *Plasma Process. Polym.* **13**, 544 (2016).
77. W. Xu, M. W. Li, G. H. Xu, and Y. L. Tian, *Jpn. J. Appl. Phys.* **43**, 8310 (2004).
78. S. Li, J.-P. Lim, J. G. Kang, and H. S. Uhm, *Phys. Plasmas* **13**, 093503 (2006).

79. X. Tu, H. J. Gallon, and J. C. Whitehead, IEEE Trans Plasma Sci. **39**, 2900-1 (2011).
80. M. S. Moss, K. Yanallah, R. W. K. Allen, and F. Pontiga, Plasma Sources Sci. Technol. **26**, 035009 (2017).
81. T. Takuma, IEEE Trans. Electr. Insul. **26**, 500 (1991).
82. E. C. Neyts, K. Ostrikov, M. K. Sunkara, and A. Bogaerts, Chem. Rev. **115**, 13408 (2015).
83. J. Van Durme, J. Dewulf, C. Leys, and H. Van Langenhove, Appl. Catal. B Environ. **78**, 324 (2008).
84. H. L. Chen, H. M. Lee, S. H. Chen, M. B. Chang, S. J. Yu, and S. N. Li, Environ. Sci. Technol. **43**, 2216 (2009).
85. H. L. Chen, H. M. Lee, S. H. Chen, Y. Chao, and M. B. Chang, Appl. Catal. B Environ. **85**, 1 (2008).
86. J. C. Whitehead, Pure Appl. Chem. **82**, 1329 (2010).
87. Y. Zeng, X. Zhu, D. Mei, B. Ashford, and X. Tu, Catal. Today **256**, 80 (2015).
88. H. K. Song, J.-W. Choi, S. H. Yue, H. Lee, B.-K. Na, and H. K. Songu, Catal. Today **89**, 27 (2004).
89. J. Sentek, K. Krawczyk, M. Mlotek, M. Kalczewska, T. Kroker, T. Kolb, A. Schenk, K.-H. Gericke, and K. Schmidt-Szaiowski, Appl. Catal. B Environ. **94**, 19 (2010).
90. X. Tu, H. J. Gallon, M. V. Twigg, P. A. Gorry, and J. C. Whitehead, J. Phys. D Appl. Phys. **44**, 274007 (2011).
91. M. Kraus, W. Egli, K. Haffner, B. Eliasson, U. Kogelschatz, and A. Wokaun, Phys. Chem. Chem. Phys. **4**, 668 (2002).
92. A. Bogaerts, T. Kozak, K. van Laer, and R. Snoeckx, Faraday Discuss. **217**, (2015).
93. K. Van Laer and A. Bogaerts, Plasma Sources Sci. Technol. **26**, 085007 (2017).
94. K. Van Laer and A. Bogaerts, Plasma Process. Polym. **14**, e1600129 (2017).
95. J. C. Whitehead, J. Phys. D. Appl. Phys. **49**, 243001 (2016).
96. Y. R. Zhang, K. Van Laer, E. C. Neyts, and A. Bogaerts, Appl. Catal. B Environ. **185**, 56 (2016).
97. Y. Zhang, H.-Y. Wang, Y.-R. Zhang, and A. Bogaerts, Plasma Sources Sci. Technol. **26**, 054002 (2017).
98. K. Van Laer and A. Bogaerts, Plasma Sources Sci. Technol. **25**, 15002 (2016).
99. H. J. Gallon, X. Tu, and J. C. Whitehead, Plasma Process. Polym. **9**, 90 (2012).

PACS: 52.65-y, 52.80.Pi

Decomposition of CO₂ in atmospheric pressure barrier discharge (analytical review)

Yu. A. Lebedev and V. A. Shakhmatov

A. V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis, Russian Academy of Sciences
29 Leninsky Ave., Moscow, 119991, Russia
E-mail: lebedev@ips.ac.ru

Received March 10, 2022

An analytical review of the results of studies of the decomposition of carbon dioxide in a barrier discharge at atmospheric pressure is presented. The decomposition of carbon dioxide CO₂ in a barrier discharge occurs under nonequilibrium conditions as a result of dissociative excitation of the molecule by electron impact. It has been established that the degree of decomposition of carbon dioxide α and the energy efficiency of the device η do not exceed $\alpha \leq 70\%$ and $\eta \leq 23\%$, respectively. These parameters depend on the geometry of the discharge, on the power deposited in the discharge, on the gas flow rate, and on the gap between the electrodes. One of the promising ways to increase the barrier discharge efficiency is to fill the gap between the electrodes with granules of various materials, including catalysts.

Keywords: barrier discharge, carbon dioxide, decomposition, plasma catalysis.

DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-2-109-131