

РЕКОНСТРУКЦИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ СИГНАЛА ДАВЛЕНИЯ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ДЕТОНАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ В ЭЖЕКТОРНОМ ПУЛЬСИРУЮЩЕМ ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНОМ ДВИГАТЕЛЕ

И. П. Бойчук¹, С. Ю. Алексянц², А. В. Гринек³, К. В. Мигалин⁴, А. М. Фищенко⁵

Аннотация: Проведена реконструкция процессов, наблюдаемых в эжекторном пульсирующем воздушно-реактивном двигателе (ПувРД) при детонационном горении. Реконструкция проводилась на основании экспериментальных данных сигнала давления, полученного на стенке камеры сгорания в области расположения отрывной зоны. Восстановлено фазовое пространство, посчитана размерность аттрактора и динамической системы. Вычисленная размерность динамической системы получилась равной трем. Построена модель, которая с заданной точностью воспроизводит имеющиеся экспериментальные реализации параметров системы.

Ключевые слова: эжекторный пульсирующий воздушно-реактивный двигатель; реконструкция динамической системы; аттрактор

DOI: 10.30826/CE25180105

EDN: YWEYQU

Литература

1. Ghose Prakash, Patra Jitendra, Datta Amitava, Mukhopadhyay Achintya. Effect of air flow distribution on soot formation and radiative heat transfer in a model liquid fuel spray combustor firing kerosene // Int. J. Heat Mass Tran., 2014. Vol. 74. P. 143–155. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.03.001.
2. Mondal S., Mukhopadhyay A., Sen S. Non-linear dynamics in pulse combustor: A review // Pramana — J. Phys., 2015. Vol. 84. P. 443–453. doi: 10.1007/s12043-014-0904-5.
3. Бойчук И. П., Сиденко К. А., Гринек А. В. Исследование процессов детонационного горения в эжекторном пульсирующем воздушно-реактивном двигателе // Advances in detonation research / Ed. S. M. Frolov. — Moscow: TORUS PRESS, 2022. P. 54–55.
4. Daw C. S., Thomas J. F., Richards G. A., Narayanaswami L. L. Chaos in thermal pulse combustion // Chaos, 1995. Vol. 5. No. 4. P. 662–670. doi: 10.1063/1.166137.
5. Datta S., Mondal S., Mukhopadhyay A., Sanyal D., Sen S. An investigation of nonlinear dynamics of a thermal pulse combustor // Combust. Theor. Model., 2009. Vol. 13. No. 1. P. 17–38. doi: 10.1080/13647830802360729.
6. Mondal Sirshendu, Mukhopadhyay Achintya, Sen Swarnendu. Effects of inlet conditions on dynamics of a thermal pulse combustor // Combust. Theor. Model., 2012. Vol. 16. No. 1. P. 59–74. doi: 10.1080/13647830.2011.606917.
7. Mondal Sirshendu, Mukhopadhyay Achintya, Sen Swarnendu. Effect of CO₂ dilution with methane in thermal pulse combustor // Summer School and Workshop on Non-Normal and Nonlinear Effects in Aero- and Thermoacoustics Proceedings. — Munich, Germany, 2013. 10 p.
8. Mondal Sirshendu, Mukhopadhyay Achintya, Sen Swarnendu. Dynamic characterization of a laboratory-scale pulse combustor // Combust. Sci. Technol., 2014. Vol. 186. No. 2. P. 139–152. doi: 10.1080/00102202.2013.851078.
9. Mondal Sirshendu, Mukhopadhyay Achintya, Sen Swarnendu. Bifurcation analysis of steady states and limit cycles in a thermal pulse combustor model // Combust. Theor. Model., 2016. Vol. 21. No. 3. P. 487–502. doi: 10.1080/13647830.2016.1251615.
10. Takagi Kazushi, Gotoda Hiroshi. A nonlinear dynamical system for combustion instability in a pulse model combustor // APS Division of Fluid Dynamics Meeting Abstracts, 2016. P. KP1.081.
11. Annaswamy A. M. Nonlinear modeling and control of combustion dynamics // Control of fluid flow / Eds. P. Koumoutsakos, I. Mezic. — Lecture notes in control and information sciences. — Berlin, Heidelberg: Springer, 2006. Vol. 330. P. 95–121. doi: 10.1007/978-3-540-36085-8_4.
12. Gupta S., Ray A., Mukhopadhyay A. Anomaly detection in thermal pulse combustors using symbolic time series

¹ООО «Сигматек», ip.boychuk@gmail.com

²Государственный университет Тольятти им. адмирала Ф. Ф. Ушакова, koval240395@yandex.ru

³ООО «Сигматек», grinyokann@gmail.com

⁴Научно-производственная фирма «Ротор», MigalinK7@gmail.com

⁵Государственный университет Тольятти им. адмирала Ф. Ф. Ушакова, fishenko2012@gmail.com

- analysis // P. I. Mech. Eng. I — J. Sys., 2006. Vol. 220. No. 5. P. 339–351. doi: 10.1243/09596518JSCE256.
13. *Mori Yosuke, Kawada Takeshi, Fukuda Shingo, Gotoda Hiroshi.* Nonlinear dynamics of attenuation behavior in combustion oscillations in a swirl-stabilized combustor // P. Combust. Inst., 2023. Vol. 39. Iss. 4. P. 4671–4679. doi: 10.1016/j.proci.2022.08.038.
 14. *Yang L. P., Bodisco T. A., Zare A., et al.* Analysis of the nonlinear dynamics of inter-cycle combustion variations in an ethanol fumigation–diesel dual-fuel engine // Nonlinear Dynam., 2019. Vol. 95. P. 2555–2574. doi: 10.1007/s11071-018-4708-x.
 15. *Мигалин К. В., Бойчук И. П., Сиденко К. А.* Прецессия внутренней отрывной зоны как источник инициирования детонационного или квазидетонационного горения в пульсирующем эжекторном воздушно-реактивном двигателе // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника, 2021. № 3. С. 113–118. EDN: PDKGHP.
 16. *Кузнецов С. П.* Динамический хаос (курс лекций). — М.: Физматлит, 2001. 296 с.
 17. *Takens F.* Detecting strange attractors in turbulence // Dynamical systems and turbulence / Eds. D. Rand, L. S. Young. — Lecture notes in mathematics. — Berlin, Heidelberg: Springer, 1981. Vol. 898. P. 366–381.
 18. *Malraison B., Atten P., Berge P., Dubois M.* Dimension of strange attractors: An experimental determination for the chaotic regime of two convective systems // J. Phys. Lett. — Paris, 1983. Vol. 44. No. 22. P. 897–902. doi: 10.1051/jphyslet:019830044022089700.
 19. *Мальцев Г. Н., Назаров А. В., Якимов В. Л.* Алгоритм реконструкции фазового пространства динамической системы и его применение для разработки прогнозных моделей // Информационно-управляющие системы, 2014. № 2. С. 33–39.
 20. *Рубанов В. Г., Филатов А. Г.* Моделирование систем. — Белгород: Изд-во БГТУ, 2006. 349 с.
 21. *Jahnke C. C., Culick F. E. C.* Application of dynamical systems theory to nonlinear combustion instabilities // J. Propul. Power, 1994. Vol. 10. No. 4. P. 508–517.
 22. *Анищенко В. С.* Знакомство с нелинейной динамикой: Лекции соросовского профессора. — М.—Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002. 144 с.

Поступила в редакцию 18.12.2023

После доработки 18.10.2024

Принята к публикации 22.10.2024